# ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

# СІДНЕЙ СТАНІСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 614.841

# **ДИСЕРТАЦІЯ**

# РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ВТРАТОЮ ЦІЛІСНОСТІ

21.06.02 пожежна безпека

21 – національна 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.

Станіслав СІДНЕЙ

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

> канд. техн. наук, доц. Володимир КОЛОСКОВ

#### АНОТАЦІЯ

Сідней С. О. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (21 – національна безпека). Національний університет цивільного захисту України, ДСНС України, Черкаси, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної наукової проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у розкритті закономірностей утворення магістральних тріщин під впливом пожежі у горизонтальних огороджувальних конструкціях, а саме порожнистих та ребристих плитах, що зокрема як підґрунтя дозволило розробити ієрархічну систему методів розрахункового оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності для таких конструкцій з метою забезпечення виконання вимог нормативного законодавства щодо забезпечення вогнестійкості будівель та споруд, що дозволить підвищити рівень пожежної безпеки будівель шляхом недопущення проникнення небезпечних чинників пожежі через втрату цілісності залізобетонних плит під час впливу факторів пожежі протягом нормованого часу дії пожежі.

Одним із найважливіших завдань пожежної безпеки є гарантування безпечної евакуації людей та створення належних умов для роботи рятувальних підрозділів під час пожежі шляхом зниження небезпеки впливу чинників пожежі. Для цього необхідно забезпечити відповідний рівень вогнестійкості конструкцій, у тому числі з огляду на збереження цілісності огороджувальних конструкцій протягом нормованого часу.

Залізобетон є одним із найбільш поширених конструкційних матеріалів, який застосовують для улаштування огороджувальних конструкцій. Поведінка залізобетонних конструкцій під час пожежі добре вивчена і має розвинуту систему методів її прогнозування, включаючи як експериментальні засоби, так і розрахунково-теоретичний підхід. Ця система втілена в міжнародному нормативному забезпеченні та українських нормах, що визначають безпечні рівні вогнестійкості та методи аналізу їхніх реальних величин. Проте, існують суттєві прогалини щодо аналізу можливості втрати вогнестійкості горизонтальними огороджувальними залізобетонними конструкціями через настання граничного стану за ознакою втрати цілісності. Це пояснюється технічними складнощами фіксування ознак втрати цілісності в експериментальних дослідженнях та недосконалістю критеріальної бази в процесі застосування розрахунковотеоретичних методів. За таких умов зберігається ймовірність помилкового оцінювання відповідності залізобетонних конструкцій вимогам щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Відсутність належної вогнестійкості може призвести до підвищеного ризику соціальних втрат через проникнення продуктів горіння, високої температури до пляхів евакуації, передчасне поширення пожежі у сусідні приміщення, що ускладнює роботу рятувальних підрозділів.

Традиційно вважається, що залізобетонні конструкції мають високу вогнестійкість, оскільки бетон повільно прогрівається під тепловим впливом, що забезпечує поступову деградацію механічних властивостей бетону та арматурної сталі. Однак існують інші процеси, які можуть призвести до передчасного утворення наскрізних дефектів, що зумовлює втрату цілісності конструкцій. Ці процеси важко вивчати експериментально та за допомогою математичного моделювання через недосконалість експериментальних засобів та складність фізичних феноменів. Перспективним підходом є застосування розвинутих методів моделювання та створення інженерних методик розрахунку, що узагальнюють результати таких досліджень. Окремо слід зазначити, що найбільш вразливими до утворення наскрізних дефектів є горизонтальні огороджувальні залізобетонні коснтрукції, до яких належать залізобетонні порожнисті та ребристі плити.

У результаті аналізу сучасного стану теоретичних та практичних досліджень пожеж показано, що методи оцінювання можливості вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності існуючі методи працюють недостатньо ефективно і мають певні недоліки.

Було зазначено, що сучасні розрахункові методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, попри їхній високий рівень розвитку, у більшості випадків не дозволяють зафіксувати настання граничного стану за ознакою втрати цілісності. Винятком є методи, що використовують як критерій настання цього стану явище крихкого руйнування бетону, проте їхнє застосування для аналізу втрати цілісності є обмеженим.

Відсутня система надійних критеріїв для фіксації настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за умови відсутності крихкого руйнування. Теоретичні уявлення про стан, за якого тріщини у таких конструкціях стають наскрізними, є суттєво обмеженими. Також відсутні надійні та практичні розрахункові методики проєктування вогнестійких горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій з точки зору забезпечення їхньої цілісності під час пожежі.

У результаті аналізу було підтверджено актуальність розроблення доступних інженерних розрахункових методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих і ребристих плит. Особливу увагу слід приділити визначенню умов настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності та розвитку теоретичної й критеріальної бази для його прогнозування.

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

У першому розділі проаналізовано сучасні нормативні вимоги щодо вогнестійкості залізобетонних конструкцій, що дозволяє визначити загальну концепцію та критерії оцінювання цього параметра. Окреслено критерії оцінювання вогнестійкості, зокрема за настанням граничних станів втрати несучої здатності, теплоізолювальної здатності та цілісності, а також розглянуто особливості впливу температури на залізобетонні конструкції. Проаналізовано формалізацію теплового впливу пожежі, що дозволяє визначити реальні умови експлуатації конструкцій під час пожежі. За результатами проведеного аналізу було встановлено, що наявна система критеріїв не дозволяє однозначно зафіксувати утворення наскрізних дефектів і, відповідно, втрату цілісності горизонтальних огороджувальних конструкцій під впливом пожежі, та було визначено, що перспективним вирішенням цієї проблеми є розвиток теоретичних уявлень про формування наскрізних тріщин та створення на їхній основі ефективних розрахункових методів оцінювання вогнестійкості таких конструкцій.

У другому розділі розроблено методику та математичну модель для моделювання поведінки порожнистих залізобетонних плит під дією пожежі за явним методом інтегрування рівнянь напружено-деформованого стану.

За результатами проведених розрахунків отримано дані, що дозволяють прогнозувати утворення та розвиток наскрізних тріщин у таких конструкціях. Виявлено особливості механізму їхнього формування, а саме: утворення поперечних тріщин унаслідок формування призми руйнування з кутом при вершині ~61°. Це стало основою для розробки відповідної математичної моделі, що дозволяє прогнозувати розвиток поперечних тріщин і дефектів наскрізного характеру, а також визначати момент настання граничного стану за ознакою втрати цілісності.

У третьому розділі проведені дослідження поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах вогневих випробувань для верифікації розробленої математичної моделі. Для цього було розроблено відповідну методику проведення експериментальних досліджень поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах вогневих випробувань. Методика містить аналіз температурних показників, параметрів напружено-деформованого стану, а також дослідження передумов утворення та розвитку наскрізних тріщин, що можуть бути пов'язані з настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності в умовах впливу пожежі.

У результаті експериментальних досліджень визначено статистичні характеристики показників вимірювань під час вогневих випробувань зразків

залізобетонних порожнистих плит. Вони підтверджують допустиму відтворюваність експериментальних результатів і відповідність умов експерименту основним положенням прийнятих методик.

Аналіз статистичних характеристик показників, отриманих в процесі проведення експерименту, показав достатню їхню достовірність та якість, оскільки середні значення відносного відхилення не перевищують 15 %.

В процесі проведення досліджень було встановлено, що контроль настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності та контроль появи тріщин і роздроблення у бетоні зразків залізобетонних порожнистих плит, підданих випробуванням, з використанням розробленої методики, показав неможливість встановити появи граничного стану за ознакою втрати цілісності за критеріями, описаними у стандартах ДСТУ ЕN 1363-1:2023 та ДСТУ EN 1365-2:2023.

Також встановлено, що утворення наскрізних тріщин відбувається в середній частині прольоту конструкції за механізмом утворення призми руйнування з кутом при вершині ~61°, що підтверджують отримані дані при проведенні математичного моделювання, щодо геометрії призми руйнування.

Оцінювання адекватності математичного моделювання поведінки залізобетонних плит за критерієм Фішера за умови використання методу скінченних елементів (далі – МСЕ) показала, що отримані результати є достовірними, оскільки розраховані значення критерію Фішера не перевищують відповідних табличних значень, що доводить ефективність використання вказаного методу для визначення меж вогнестійкості за граничними станами за ознаками втрати теплоізолювальної та несучої здатності, а також втрати цілісності.

У четвертому розділі розроблений уточнений метод оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити, який на відміну від того, що існує, дозволяє врахувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності шляхом візуального аналізу повністю зруйнованих скінченних елементів у бетоні, що дозволяє перевіряти умову появи наскрізних тріщин та/або дефектів, що призводять до настання цього граничного стану.

Також в процесі проведених досліджень було розроблено математичні моделі, що визначають критерії, які дозволяють прогнозувати утворення наскрізних поперечних і поздовжніх тріщин та дефектів у залізобетонних порожнистих плитах, та вказує про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для таких конструкцій в умовах пожежі, що стало передумовою для розробки спрощеного методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плитах до втратою цілісності.

У п'ятому розділі виконано математичне моделювання поведінки залізобетонних ребристих плит під впливом пожежі. Це дозволило розробити уточнений метод оцінювання вогнестійкості для залізобетонних ребристих плит, зокрема для випадків втрати цілісності внаслідок руйнування панелі у комірках між поздовжніми та поперечними ребрами плити.

Крім того, у цьому розділі розроблено спрощений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості ребристих плит за ознакою втрати цілісності. Він ґрунтується на розробленій математичній моделі, яка визначає критерій утворення наскрізної тріщини у комірках між ребрами. Основою цього критерію є енергетичний підхід, що базується на порівнянні віртуальних робіт внутрішніх і зовнішніх сил у полиці плити між ребрами, визначених за принципом можливих переміщень.

У шостому розділі на основі виявлених закономірностей настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності було створено для горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій регресійну залежність зміни межі вогнестійкості в залежності від конструктивних параметрів конструкцій, зокрема:

- для порожнистих плит залежно від висоти перерізу (*H*) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні плити (*w*), що описується регресійною залежністю:  $U_e = 3,37 + 0,119 \cdot H + 1,01 \cdot w + 0,000625 \cdot H \cdot w$ ;

- для ребристих плит залежно від товщини перерізу панелі між ребрами (*h<sub>s</sub>*) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні панелі між ребрами (*w<sub>s</sub>*),

що описується регресійною залежністю:  $U_e = 1, 2 + 0, 06 \cdot h_s + 1, 2 \cdot w_s + 0, 01 \cdot h_s \cdot w_s$ .

На основі проведених досліджень в цьому розділі розроблено табличний метод оцінювання вогнестійкості для залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним станом втрати цілісності, залежно від їх конструктивних параметрів, що дало можливість розробити ієрархічна систему методів розрахункового оцінювання залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності з врахуванням отриманих результатів у попередніх розділах роботи.

У сьомому розділі розроблено алгоритми уточнених та спрощених методів оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності.

Запропонована система дозволяє забезпечити відповідність нормативним вимогам та підвищує точність оцінювання вогнестійкості:

• на 12% для порожнистих плит порівняно з результатами вогневих випробувань;

• на 16,1% для ребристих плит порівняно з результатами математичного моделювання.

Розроблена система сприяє виявленню наскрізних дефектів ще до втрати несучої здатності, що дає змогу точніше оцінювати ризики втрати цілісності конструкцій під час пожежі. Це, своєю чергою, підвищує рівень пожежної безпеки будівель, дозволяючи своєчасно впроваджувати превентивні заходи.

Ключові слова: вогнестійкість, цілісність, тріщини, залізобетонні плити, математичне моделювання пожежі, вогневі випробування, повнофакторний експеримент, метод скінченних елементів.

## ABSTRACT

*Sidnei S. O.* Development of scientific foundations for assessing the fire resistance of horizontal enclosing reinforced concrete structures by loss of integrity. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 21.06.02 – fire safety (21 – national security). National University of Civil Protection of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The dissertation is dedicated to solving a pressing scientific problem in the field of fire safety, which involves revealing the patterns of main crack formation under fire exposure in horizontal enclosing structures, specifically hollow and ribbed slabs. This, in turn, has provided the foundation for developing a hierarchical system of methods for computational assessment of fire resistance based on the attainment of the ultimate state due to the loss of integrity for such structures. The goal is to ensure compliance with regulatory fire resistance requirements for buildings and structures, thereby enhancing fire safety by preventing the penetration of hazardous fire factors due to the loss of integrity of reinforced concrete slabs during fire exposure for the standardized fire duration.

One of the most critical fire safety objectives is ensuring the safe evacuation of people and creating appropriate conditions for the operation of rescue units during a fire by reducing the danger posed by fire factors. To achieve this, it is necessary to provide an adequate level of fire resistance for structures, including maintaining the integrity of enclosing structures throughout the standardized fire duration.

Reinforced concrete is one of the most commonly used construction materials for enclosing structures. The behavior of reinforced concrete structures during fire exposure is well studied and has a developed system of prediction methods, including both experimental approaches and computational-theoretical models. This system is reflected in international standards and Ukrainian regulations, which define safe levels of fire resistance and methods for analyzing their actual values. However, significant gaps remain in the analysis of fire resistance loss in horizontal enclosing reinforced concrete structures due to the attainment of the ultimate state caused by the loss of integrity. This is due to the technical challenges of detecting integrity loss in experimental studies and the lack of a well-defined criterion base for applying computational-theoretical methods.

Under such conditions, the probability of erroneous assessment of reinforced concrete structures' compliance with fire resistance requirements in terms of the ultimate state due to integrity loss persists. The lack of adequate fire resistance can lead to an increased risk of social losses due to the penetration of combustion products and high temperatures into evacuation routes, the premature spread of fire to adjacent rooms, and complications in rescue operations.

It is traditionally believed that reinforced concrete structures exhibit high fire resistance since concrete heats up slowly under thermal exposure, allowing for the gradual degradation of the mechanical properties of both concrete and reinforcing steel. However, other processes can lead to the premature formation of through defects, resulting in the loss of structural integrity. These processes are difficult to study experimentally and through mathematical modeling due to the imperfection of experimental tools and the complexity of physical phenomena. A promising approach involves the application of advanced modeling methods and the development of engineering calculation methodologies that generalize the results of such studies.

It is particularly important to note that horizontal enclosing reinforced concrete structures, such as hollow and ribbed reinforced concrete slabs, are the most vulnerable to the formation of through defects.

An analysis of the current state of theoretical and practical fire research has shown that existing methods for assessing fire resistance based on the ultimate state due to the loss of integrity are not sufficiently effective and have certain limitations. It has been noted that despite the high level of development of modern computational methods for assessing the fire resistance of horizontal enclosing reinforced concrete structures, in most cases, they do not allow for the identification of the ultimate state due to the loss of integrity. An exception is methods that use brittle concrete failure as a criterion for reaching this state, but their applicability for analyzing integrity loss remains limited. There is no reliable system of criteria for detecting the ultimate state of fire resistance due to the loss of integrity in horizontal enclosing reinforced concrete structures in the absence of brittle failure. Theoretical understanding of the conditions under which cracks in such structures become through-cracks remains significantly limited. Additionally, there are no reliable and practical calculation methodologies for designing fire-resistant horizontal enclosing reinforced concrete structures in terms of ensuring their integrity during a fire.

As a result of the analysis, the relevance of developing accessible engineering calculation methods for assessing the fire resistance of horizontal enclosing reinforced concrete structures, particularly hollow and ribbed slabs, was confirmed. Special attention should be given to determining the conditions for reaching the ultimate fire resistance state due to the loss of integrity and to developing the theoretical and criterion-based framework for its prediction.

The introduction substantiates the choice of the research topic, formulates the research objectives and tasks, highlights the scientific novelty and practical significance of the work, and provides a general overview of the study.

The first chapter analyzes modern regulatory requirements for the fire resistance of reinforced concrete structures, allowing for the identification of the general concept and evaluation criteria for this parameter. It outlines the criteria for assessing fire resistance, particularly in terms of the ultimate states of load-bearing capacity, thermal insulation capacity, and integrity. Additionally, it examines the impact of temperature on reinforced concrete structures. The formalization of fire-induced thermal effects is analyzed to determine the actual operational conditions of structures during a fire. Based on the conducted analysis, it was established that the existing system of criteria does not allow for the unambiguous identification of through defects and, consequently, the loss of integrity of horizontal enclosing structures under fire conditions. It was determined that a promising solution to this problem is the further development of theoretical concepts regarding the formation of through cracks and the creation of effective computational methods for assessing the fire resistance of such structures.

In the second chapter, a methodology and a mathematical model for simulating the behavior of hollow reinforced concrete slabs under fire exposure using the explicit integration method for stress-strain state equations were developed.

The results of the calculations provide data that enable the prediction of the formation and development of through cracks in such structures. The specific features of their formation mechanism were identified, namely, the occurrence of transverse cracks due to the formation of a failure prism with an apex angle of approximately 61°. This finding formed the basis for the development of an appropriate mathematical model that allows for predicting the development of transverse cracks and through defects, as well as determining the moment of reaching the ultimate state due to the loss of integrity.

In the third chapter, studies were conducted on the behavior of a reinforced concrete hollow slab under fire testing conditions to verify the developed mathematical model. For this purpose, a corresponding methodology for conducting experimental studies on the behavior of a reinforced concrete hollow slab under fire tests was developed. The methodology includes an analysis of temperature indicators, stress-strain state parameters, and the study of prerequisites for the formation and development of through cracks, which may be associated with reaching the fire resistance limit state due to loss of integrity under fire exposure.

As a result of the experimental studies, statistical characteristics of the measurement indicators during fire tests of reinforced concrete hollow slab samples were determined. These characteristics confirm the acceptable reproducibility of the experimental results and the compliance of the experimental conditions with the fundamental principles of the adopted methodologies.

The analysis of the statistical characteristics of the indicators obtained during the experiment demonstrated their sufficient reliability and quality, as the mean relative deviation values do not exceed 15%.

During the research, it was established that monitoring the onset of the fire resistance limit state due to loss of integrity, as well as tracking crack formation and concrete fragmentation in the tested reinforced concrete hollow slabs using the developed methodology, revealed the impossibility of determining the limit state due to loss of integrity based on the criteria described in the standards DSTU EN 1363-1:2023

and DSTU EN 1365-2:2023.

Additionally, it was found that the formation of through cracks occurs in the midspan region of the structure following the failure prism formation mechanism, with an apex angle of approximately 61°. This finding aligns with the data obtained from mathematical modeling regarding the geometry of the failure prism.

The adequacy assessment of the mathematical modeling of reinforced concrete slab behavior using Fisher's criterion and the finite element method (FEM) demonstrated the reliability of the obtained results. The calculated Fisher criterion values did not exceed the corresponding tabulated values, proving the effectiveness of this method in determining fire resistance limits based on the loss of thermal insulation capacity, load-bearing capacity, and integrity.

In the fourth chapter, an improved method for assessing the fire resistance of reinforced concrete hollow slabs was developed. Unlike existing methods, this approach accounts for the fire resistance limit state due to loss of integrity by visually analyzing fully destroyed finite elements in the concrete. This enables the verification of conditions for the formation of through cracks and/or defects leading to this limit state.

Additionally, during the research, mathematical models were developed to establish criteria for predicting the formation of transverse and longitudinal through cracks and defects in reinforced concrete hollow slabs. These models indicate the onset of the fire resistance limit state due to loss of integrity for such structures under fire conditions. This served as the basis for developing a simplified method for assessing the fire resistance of reinforced concrete hollow slabs based on the loss of integrity.

In the fifth chapter, mathematical modeling of the behavior of reinforced concrete ribbed slabs under fire conditions was conducted. This allowed for the development of an improved method for assessing the fire resistance of reinforced concrete ribbed slabs, particularly in cases where integrity is lost due to panel failure in the cells between longitudinal and transverse ribs.

Furthermore, this chapter presents a simplified method for the computational assessment of ribbed slab fire resistance based on the loss of integrity. It is based on a developed mathematical model that establishes a criterion for the formation of through

cracks in the cells between ribs. The foundation of this criterion is an energy-based approach that compares the virtual work of internal and external forces in the flange of the slab between the ribs, determined using the principle of possible displacements.

In the sixth chapter, based on the identified patterns of the fire resistance limit state due to loss of integrity, a regression dependence was established for horizontal enclosing reinforced concrete structures. This dependence describes the variation in fire resistance limits as a function of the structural parameters of the construction, including:

- for hollow slabs, depending on the section height (*H*) and the axial distance from the reinforcement to the heated surface of the slab (*w*), which is described by the regression dependence:  $U_e = 3,37 + 0,119 \cdot H + 1,01 \cdot w + 0,000625 \cdot H \cdot w$ 

- for ribbed slabs, depending on the thickness of the panel section between ribs  $(h_s)$  and the axial distance from the reinforcement to the heated surface of the panel between ribs  $(w_s)$ , which is described by the regression dependence:  $U_e = 1,2 + 0,06 \cdot h_s + 1,2 \cdot w_s + 0,01 \cdot h_s \cdot w_s$ 

Based on the conducted research, this section developed a tabular method for assessing the fire resistance of reinforced concrete hollow and ribbed slabs based on the ultimate limit state of integrity loss, depending on their structural parameters. This allowed for the development of a hierarchical system of calculation methods for evaluating the fire resistance of reinforced concrete hollow and ribbed slabs in terms of integrity loss, taking into account the results obtained in the previous sections of the study.

In the seventh chapter, algorithms for refined and simplified methods for assessing the fire resistance of such structures based on the ultimate limit state of integrity loss were developed.

The proposed system ensures compliance with regulatory requirements and improves the accuracy of fire resistance assessment:

- by 12% for hollow slabs compared to fire test results;
- by 16,1% for ribbed slabs compared to mathematical modeling results.

The developed system facilitates the detection of through defects before the loss of load-bearing capacity, allowing for a more accurate assessment of the risks of integrity loss in structures during a fire. This, in turn, enhances the fire safety level of buildings by enabling the timely implementation of preventive measures.

**Keywords:** fire resistance, integrity, cracks, reinforced concrete slabs, mathematical fire modeling, fire tests, full-factorial experiment, finite element method.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у 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 Scince Core Collection

1. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Dankevych I., Pozdieiev S. Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2021. Vol. 6. № 7 (114). Р. 59–67. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено методики проведення обчислювальних експериментів з розподілу температури у двотаврових гофрованих сталевих балках в умовах вогневих випробувань.

2. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Lavrinenko L., Pozdieiev S. Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineralwool cladding. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2021. Vol. 5. № 1 (113). Р. 24–32. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем створено регресійні залежності для оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит і сходових кліток відповідно до найбільш значущих конструктивно-геометричних параметрів.

3. Nesen I., **Sidnei S.**, Petukhova O., Zhuravskij M., Tishchenko E. Refining a tabular method for assessing the fire resistance of reinforced concrete structures. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2023. Vol. 4. № 7 (124). Р. 72–78. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем створено регресійні залежності для оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит і сходових кліток відповідно до

найбільш значущих конструктивно-геометричних параметрів.

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. *Scientific journal «Ecological Engineering & Environmental Technology»*. 2023. Vol. 24(4). P. 138–146. (*Видання включено до наукометричної бази Scopus*).

Особисто здобувачем встановлено закономірності залежності дисперсії температури в камері згоряння печі від визначених параметрів.

5. Sidnei S., Berezovskyi A., Kasiarum S., Chastokolenko I. Revealing patterns in the behavior of a reinforced concrete slab in fire based on determining its stressed and deformed state. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2023. Vol. 5. № 7 (125). Р. 43–49. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено розрахункова модель для проведення обчислювальних експериментів з оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити, виконано обробка результатів та визначено закономірності межі вогнестійкості від рівня механічного навантаження.

6. Sidnei S., Myroshnyk O., Kovalov A., Veselivskyi R., Hryhorenko K., Shnal T., Matsyk I. Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2024. Vol. 4. № 7 (130). Р. 70–77. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем проведено комп'ютерне моделювання поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах пожежі та розроблено метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

7. Sidnei S., Gonchar S., Zhuravskij M., Matsyk I., Nozhko I., Petukhova O., Shnal T., Vykhrystenko V. Defining a pattern in the loss of integrity by ribbed plates under fire conditions. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2024. Vol. 5. № 7 (131). Р. 15–24. (Видання включено до

наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем проведено комп'ютерне моделювання поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі та розроблено метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану втрати цілісності.

### Монографія

8. **Sidnei S.**, Pelypenko M., Grygorian M., Kropyva M., Taran I., Holovchenko S. Hierarchical structure of calculation methods for assessing the fire resistance of enclosure horizontal structures under the limit state of loss of integrity. Scientific monograph «Assessment of technical condition: means of measurement, safety, risks». *Technology center PC*. 2024. P. 64–96.

Особисто здобувачем розроблено ієрархічна система методів оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності для залізобетонних порожнистих та ребристих плит.

# Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

9. 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: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2016. Том № 1 (1). С. 38–43.

Особисто здобувачем виконано комп'ютерне моделювання з метою визначення впливу конструктивних особливостей вертикальної випробувальної установки на рівномірність розподілу температур у печі при впливі стандартного температурного режиму пожежі.

10. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Некора О. В., Сідней С. О. Математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні у ній повномасштабних вогневих випробувань. *Збірник наукових праць: «Пожежна безпека»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2020. Том № 36. С. 121–130.

Особисто здобувачем виконано обробка результатів математичного

моделювання розвитку та поширення пожежі у приміщеннях натурної моделі триповерхової будівлі та визначений вплив факторів статистичної похибки експерименту.

11. Гвоздь В., Некора О., Сідней С., Неділько І., Федченко С., Тищенко Є. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з урахуванням рівня механічного навантаження. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. Том 5. № 1. С. 40–49.

Особисто здобувачем розроблено математичну модель температурної й механічної реакції впливу пожежі на будівельні конструкції промислових будівель на основі методу скінченних елементів.

12. Сідней С. Розробка методики розрахунку розподілу температури у плоских залізобетонних плитах при пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. Том 5. № 2. С. 83–88.

13. Сідней С. О., Кобко В. А., Федченко С. М., Змага М. І. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2022. Том 6. № 1. С. 95–103.

Особисто здобувачем розроблено математичні моделі порожнистих залізобетонних плит в умовах пожежі з метою удосконалення зонного методу оцінювання вогнестійкості таких конструкцій.

14. Рудешко I., Заїка Н., Куліца О., Сідней С. Дослідження ребристої залізобетонної панелі покриття за умовами стандартного температурного режиму пожежі. Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2022. Том 6. № 2. С. 94–101.

Особисто здобувачем розроблено теплові математичні моделі для визначення розподілу температури у залізобетонній ребристій плиті при впливі стандартного температурного режиму пожежі. 15. Поздєєв С., Березовський А., Рудешко І., Костенко Т., Сідней С. Дослідження ефективності ієрархічного підходу щодо розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних балок за єврокодом 2. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. Том 7. № 1. С. 99–106.

Особисто здобувачем проведено дослідження визначення несучої здатності залізобетонної балки в умовах впливу пожежі, застосовуючи спрощену методику зонного методу.

16. Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Костенко Т., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної ребристої плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. Том 7. № 2. С. 217–226.

Особисто здобувачем розроблено обчислювальні моделі для розв'язання теплотехнічної та статичної задач щодо визначення напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі.

17. Сідней С. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті під час моделювання пожежі. *Науковий вісник: «Цивільний захист та пожежна безпека»*. Київ. ІДУ НД ЦЗ. 2024. № 1 (17). С. 93–102.

18. Поздєєв С., Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8. № 1. С. 91–100.

Особисто здобувачем проведено теплотехнічні та статичні розрахунки з метою оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити з використанням методу скінченних елементів.

19. Сідней С. О., Тищенко О. М., Ковальов А. І., Григоренко К. В. Обґрунтування методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за втратою цілісності. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. Харків: Харківський національний університет міського

господарства імені О. М. Бекетова. 2024. Том б. № 187. С. 218-223.

Особисто здобувачем виконано розрахунок напружено-деформованого стану фрагменту залізобетонної порожнистої плити в умовах сумісного термосилового впливу та розроблений метод оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

20. Сідней С., Рудешко І., Іщенко І., Іваненко О., Степаненко В. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по ребристій плиті при моделюванні пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8. № 2. С. 121–132.

Особисто здобувачем розроблено обчислювальна модель для розв'язання теплотехнічної задачі розподілу температури по фрагменту залізобетонної ребристої плити.

21. Сідней С. О. Уточнений метод оцінювання вогнестійкості ребристих плит за втратою цілісності. *Збірник наукових праць: «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2024. Том 40. № 2. С. 139–153.

## Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

22. Березовський А. І., Сідней С. О., Рудешко І. В. Оцінка ефективності матеріалів для герметизації пустот будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць: «Науковий вісник будівництва»*. Харків: ХНУБА. 2019. Том 98. №4. С. 287–294.

Особисто здобувачем проведено дослідження факторів, що впливають на поширення пожежі в будівлях.

23. 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. Trans Tech Publications Ltd.* 2020. T. 1006. P. 107–116. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем оброблено результати математичного моделювання впливу різних температурних режимів пожежі та побудовано номограми для визначення межі вогнестійкості сталевих конструкцій при нормативних значеннях критичної температури.

24. Shnal T., Pozdieiev S., Sidnei S., Shvydenko A. Determination of the Charring Rate of Timber to Estimate the Fire Resistance of Structures at Real Temperature Modes of Fires. *Proceedings of EcoComfort 2020 2nd International Scientific Conference «EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering»*. Cham: Springer. 2020. Vol. 100. P. 409–418. (*Видання включено до наукометричної бази Scopus*).

Особисто здобувачем встановлено та побудовано регресійну залежність максимальної швидкості обвуглювання та максимального часу процесу обвуглювання дерев'яних конструкцій від найбільш значущих параметрів приміщень, де виникає пожежа.

25. 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. *Збірник наукових праць: Геотехнічна механіка.* Дніпро: Інститут геотехнічної механіки ім. Н. Полякова НАН України. 2020. № 152. С. 116–126.

Особисто здобувачем оброблено результати розподілу температури сталевих колон з вогнезахистом в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

26. Hvozd V., Tishchenko E., Berezovskyi A., Sidnei S. Research of fire resistance of elements of steel frames of industrial buildings. *Scientific journal: «Materials Science Forum»*. Bäch: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1038. P. 506–513. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальні моделі та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості горизонтальних та вертикальних сталевих конструкцій за втратою несучої здатності.

27. Nekora V., **Sidnei S.**, Shnal T., Nekora O. The Improvement of the Method to Determine the Temperature in Steel Reinforced Concrete Slabs in Assessment of their Fire Resistance. *Scientific journal «Materials Science Forum»*. Bäch: Trans Tech

Publications Ltd. 2021. Vol. 1066. P. 216–223. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем встановлено залежності вогнестійкості сталезалізобетонних плит від конструктивних параметрів.

28. Sidnei S. O., Nuianzin O. M., Kostenko T. V., Berezovskyi A. I., Wąsik W. A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. Sumy: Sumy State University. 2023. Vol. 10. №2. P. D1–D7. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальну модель напруженодеформованого стану порожнистої плити в умовах пожежі, а також методику розрахунку її руйнування в цих умовах.

#### Монографія

29. Поздєєв С. В., Сідней С. О., Гвоздь В. М., Тищенко О. М., Нуянзін О. М., Некора О. В., Шналь Т. М., Березовський А. І., Рудешко І. В., Федченко С. М., Неділько І. А.. Достовірність результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін. Черкаси: ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. 100 с.

Особисто здобувачем розроблено математичні моделі та проведено обчислювальні експерименти щодо визначення вогнестійкості несучих стін.

## Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

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

Особисто здобувачем проведено обчислювальні експерименти дослідження рівномірності прогріву несучої залізобетонної стіни при її випробуваннях на вогнестійкість.

31. 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*. Київ: ІДУ НД ЦЗ. 2017. С. 55–56. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено обчислювальні експерименти дослідження рівномірності прогріву несучої залізобетонної стіни при її випробуваннях на вогнестійкість.

32. 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. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичні моделі для визначення конфігурації вертикальної випробувальної печі з найбільш рівномірним розподілом температур.

33. 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 mettalurgy, material engineering, production engineering and physics». Series: Monografie №6. Czestochowa. 2017. P. 439–444. (Форма участі – заочна).* 

Особисто здобувачем розроблено математичні моделі для визначення конфігурації вертикальної випробувальної печі з найбільш рівномірним розподілом температур.

34. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Медвідь Б. А. Моделювання процесів нестаціонарного теплообміну при випробуваннях залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Збірник VI міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». Харків: НУЦЗУ. 2017. С. 142–143. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем виконано моделювання процесів нестаціонарного теплообміну при випробуваннях залізобетонних конструкцій на вогнестійкість.

35. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Березовський О. І. Дослідження впливу дизайну камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2017. С. 222–223. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження впливу конструктивних параметрів камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість.

36. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. *MATEC Web of Conferences Volume 116, 2017. 6th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud-2017).* Kharkiv: USURT. 2017. P. 02027. (Форма участі – заочна). (*Budanna включено до наукометричної бази Scopus*).

Особисто здобувачем проведено дослідження впливу конструктивних параметрів камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість.

37. Кударенко К. С., Горобець В. О., Поздєєв С. В., Сідней С. О. Розрахунок оцінки пожежної небезпеки у внутрішньому просторі електричної шафи запорізької атомної електричної станції. *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика»*, Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2018. С. 31–34. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведенно дослідження щодо настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності електричної шафи запорізької атомної електричної станції в умовах пожежі.

38. Сідней С. О., Кударенко К. С. Перевірка впливу вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції* 

молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності». Львів: ЛДУ БЖД. 2018. С. 134–135. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження щодо перевірки впливу вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій.

39. Pozdieiev S., Nekora O., Kryshtal T., Zazhoma V. and **Sidnei S.** Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire. *MATEC Web Conf.* Kharkiv: USURT. 2018. 02026. (Форма участі – заочна). (*Видання включено до наукометричної бази Scopus*).

Особисто здобувачем взято участь в розробці математичної моделі прогнозування прогресуючого руйнування в будівлях із залізобетонними конструкціями.

40. Pozdieiev S., Pidgoretskiy Y., Nekora O., **Sidnei S.,** Tyshchenko O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *Conference Transport Technologies and Infrastructure Special*. Kharkiv: USURT. 2018. Vol. 7. № 4.3. P. 298–302. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці методики дослідження впливу конструктивних параметрів гнучких елементів огорожі в умовах вибуху.

41. Pozdieiev S., Nekora O., Kryshtal T., **Sidnei S.** and Shvydenko A. Improvement of the estimation method of the possibility of progressive destruction of buildings caused by fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Kharkiv: USURT. 2019. Vol. 708. P. 012067. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем взято участь в розробці математичної моделі прогресуючого руйнування для каркасів будівель.

42. Сідней С., Ткаченко Є. Визначення залежності між значенням межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій i вертикальних ïх обігрівальних дисперсією температур на поверхнях. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж

*та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2020. С. 207–208. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження з виявлення впливу залежності між значенням межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій і дисперсією температур на їх обігрівальних поверхнях.

43. Сідней С. О., Ткаченко Є. Г., Горбач Г. І., Сідней А. С. Визначення впливу вимірювальних приладів на достовірність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій. *Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2020. С. 215–217. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем визначено вплив вимірювальних приладів на достовірність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій.

44. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Сідней С. О. Удосконалення методу оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій в умовах температурного режиму пожежі, наближеного до реального. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2020. С. 194–195. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці скінченно-елементної моделі для проведення досліджень впливу пожежі на сталеві конструкції.

45. Zmaha M. I., Pozdieiev S. V., Zmaha Y. V., Nekora O. V. and Sidnei S. O. Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2021)*. Kharkiv: USURT. 2021. Vol. 1021. P. 012031. (Видання включено до наукометричної бази Scopus). (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці методики експериментальних досліджень поведінки дерев'яної балки із вогнезахистом в умовах впливу пожежі. 46. Сідней С. О., Несен І. С., Ромененко А. О., Сідней А. С. Дослідження впливу на показники значення межі вогнестійкості вертикальних залізобетонних будівельних конструкцій від дисперсії температур на їх обігрівальних поверхнях. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 58–59. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальну модель для проведення досліджень впливу на показники значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій від дисперсії температур.

47. Данкевич І., Канюк В., Неділько І., Сідней А., Лозумирська А., Трошкін С., Сопільник В., Сідней С. Дослідження прогріву залізобетонної плити в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 23–24. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальну модель для проведення досліджень розподілу температури в залізобетонній плиті плит перекриттів за допомогою методу скінченних елементів.

48. Гвоздь В., Тищенко О., Поздєєв С., Шналь Т., Луб'яний А., Сідней С. Оцінка вогнестійкості залізобетонних плит перекриттів за умов стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали XI Всеукраїнської науковопрактичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 88–90. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит в умовах пожежі.

49. 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*. Bristol: IOP Publishing Ltd. 2021. Vol. 1021. № 1. P. 012023. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем взято участь у розробці методики проведення повнофакторного експерименту з вивчення впливу пожежі в кабельних тунелях.

50. Некора В. С., Сідней С. О., Шналь Т. М., Некора О. В. Поведінка сталезалізобетонної плити при пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2022. С. 34–35. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці обчислювальних моделей розподілу температури по сталезалізобетонній плиті в умовах пожежі.

51. Поздєєв С. В., Несен І. С., Сідней С. О. Оцінка вогнестійкості залізобетонного маршу сходової клітини. Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення». Львів: ЛДУ БЖД. 2022. С. 132–134. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем взято участь в розробці методики проведення експериментальних досліджень оцінювання межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу.

52. Поздєєв С. В., Березовський А. І., Неділько І. А., Сідней С. О. Обґрунтування спрощеного розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонної пустотної плити. *Матеріали IX Міжнародної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки»*. Одеса: ОДАБА. 2022. С. 155–157. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено спрощенний розрахунковий метод оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити.

53. Sidnei S., Shnal T., Kholod P., Pozdieiev S. Forecasting the Behavior of Steel Beams with Corrugated Walls Under the Thermal Exposure of a Fire. In: Blikharskyy, Z. (eds) *Proceedings of EcoComfort 2022. EcoComfort 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham. 2022. Vol 290. P. 388–398. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено скінченно-елементну модель для

дослідження розподілу температури у сталевій балці.

54. Банщиков С. О., Сідней С. О., Рудешко І. В. Дослідження розподілу температури по залізобетонній колоні при впливі стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених: «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. Харків: НУЦЗУ. 2023. С. 12. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження розподілу температури в залізобетонній колоні в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

55. Сідней С. О., Березовський А. І., Касярум С. О., Частоколенко І. П. Дослідження поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2023. С. 147–148. (Форма участі – очна).

Особисто здобувачем проведено обчислювальні експерименти з оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за допомогою методу скінченних елементів.

56. Vranay F., Zelenakova M., Nekora O., **Sidnei S.** Determination of temperature distribution in a ribbed reinforced concrete slab under the thermal influence of fire. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. С. 100–102. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено обчислювальну модель та проведено розрахунок розподілу температури в залізобетонній ребристій плиті в умовах пожежі.

57. Pozdieiev S., **Sidnei S.**, Hvozd V., Tyshchenko O., Shnal T.. Study of fire resistance of reinforced concrete slabs under thermal influence based on the use of the parametric temperature fire modes. *Proceedings of the 9th International scientific conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structure and Buildings» (TransBud 2021).* Kharkiv. 2023. Vol. 2684. № 1. P. 030035-1-030035-8.

(Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено скінченно-елементну модель для оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит в умовах впливу параметричних температурних режимів пожежі.

58. Sidnei S., Berezovskyi A., Nedilko I., Pozdieiev S. The improvement of the simplified calculation method for assessing the fire resistance of a hollow-core slab. *AIP Conf. Proc.* 2023. Vol. 2840. №1. Р. 040004. (Форма участі – заочна). (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів для оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити.

59. Pozdieiev S., Sidnei S., Nekora O., Subota A., Kulitsa, O. Study of the Destruction Mechanism of Reinforced Concrete Hollow Slabs Under Fire Conditions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Kharkiv. 2023. P. 447–457. (Видання включено до наукометричної бази Scopus). (Форма участі – очна).

Особисто здобувачем проведено дослідження механізму руйнування залізобетонної порожнистої плити в умовах пожежі.

60. Зуєнко М., Брусліновська П., Самойленко М., Сулейманов А., Сідней С. Дослідження залізобетонної ребристої плити під час оцінювання вогнестійкості за втратою несучої здатності. *XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2024. С. 161–164. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем проведено дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити при оцінюванні вогнестійкості за втратою несучої здатності.

61. Сідней С. О., Березовський А. І., Рудешко І. В., Іщенко І. І. Дослідження вогнестійкості порожнистої плити при пожежі за допомогою математичного моделювання. *Х Міжнародна конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки»*. Одеса. 2024. (Форма участі – очна).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів, та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити.

62. Поздєєв С., Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Іщенко І. Дослідження настання граничних станів з вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XV Міжнародної науковопрактичної конференції.* Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 254–255. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів, та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити.

63. Сідней С., Рудешко І., Романенко Д., Зуєнко М. Дослідження закономірності впливу навантаження на вогнестійкість ребристій залізобетонній плиті. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 134–136. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів та проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити.

64. Сідней С., Тейзе А., Рудешко І. Дослідження втрати несучої здатності залізобетонної ребристої плити під час впливу пожежі. *Надзвичайні ситуації:* безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 136–138. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів та проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити.

65. Сідней С. Вплив скінченно-елементної сітки на розподіл температур у плиті при пожежі. *XXIII Наукова конференція «Наукові підсумки 2024 року»*.

*Збірка наукових тез.* Харків: Технологічний центр. 2024. С. 31. (Форма участі – заочна).

АНОТАЦІЯ
3MICT
ВСТУП
РОЗДІЛ І АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ РОЗРАХУНКОВОГО ОЦІНЮВАННЯ
ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ
1.1. Аспекти сучасного нормування вогнестійкості залізобетонних
конструкцій
1.2. Критеріальна база для оцінювання вогнестійкості залізобетонних
конструкцій
1.3. Формалізація теплової дії пожежі на залізобетонні конструкції 68
1.4. Експериментальний підхід до оцінювання вогнестійкості
залізобетонних конструкцій
1.5. Розрахункові методи оцінювання вогнестійкості залізобетонних
конструкцій
1.6. Зміна властивостей бетону в умовах впливу пожежі 86
1.7. Зміна властивостей арматурної сталі в умовах впливу пожежі
1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах
1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах           впливу пожежі
<ul> <li>1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі</li></ul>
<ul> <li>1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі</li></ul>
<ul> <li>1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі</li></ul>
<ul> <li>1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі</li></ul>
<ul> <li>1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі</li></ul>
1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах         впливу пожежі
1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах         впливу пожежі
1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах         впливу пожежі
1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах         впливу пожежі

поведінки горизонтальних огороджувальних конструкцій в умовах впливу

пожежі
2.2. Базова математична модель явного методу розрахунку динамічних
систем деформованих тіл 119
2.3. Скінченно-елементна апроксимація основних рівнянь математичної
моделі динамічної взаємодії механічних систем 124
2.4. Математична модель щодо контактної взаємодії 126
2.5. Явний чисельний метод апроксимації рівнянь динаміки 129
2.6. Метод математичного моделювання поширення тріщин у матеріалі 133
2.7. Математична модель поведінки бетону в умовах механічного
навантаження
2.8. Математична модель поведінки арматурної сталі під час механічного
навантаження
2.9. Технічне описання і вихідні дані фрагмента горизонтальної
огороджувальної конструкції для дослідження її поведінки під час
пожежі
2.9.1. Конструктивна схема плити перекриття та її фрагмента для створення
розрахункової області
2.9.2. Характеристики матеріалів конструкції 145
2.9.3. Механічне навантаження та граничні умови 147
2.9.4. Скінченно-елементна схема моделі 149
2.9.5. Математична модель для визначення теплового навантаження на
фрагмент конструкції
2.10. Обговорення результатів розрахунку 159
2.11. Висновки до розділу 163
РОЗДІЛ З РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
ПОВЕДІНКИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ В
УМОВАХ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ
3.1. Описання методик, матеріалів, засобів та обладнання
експериментальних досліджень164

35

Експериментальні засоби та обладнання для 3.1.1. проведення 3.1.2. Методика виготовлення зразків конструкцій для вогневих випробувань ..... 171 3.1.3. Розташування термопар у зразку конструкції ДЛЯ високотемпературних випробувань. ..... 176 3.2. Методика вогневих випробувань зразків конструкцій ..... 179 3.2.1. Методика початкової підготовки установки зразка конструкції до випробувань. ..... 179

3.2.2. Методика здійснення вогневих випробувань зразків конструкцій. .. 179

3.4.2. Результати вимірювань деформацій залізобетонних плит-зразків.... 194

3.5. Дослідження статистичних показників експериментальних даних ..... 201
4.5. Висновки до розділу ...... 242

РОЗДІЛ5РОЗРАХУНКОВЕОЦІНЮВАННЯВОГНЕСТІЙКОСТІЗАЛІЗОБЕТОННИХРЕБРИСТИХПЛИТЗА НАСТАННЯМГРАНИЧНОГОСТАНУВТРАТИ ЦІЛІСНОСТІ244

 5.5. Висновки до розділу
 269

 РОЗДІЛ
 6
 ІЄРАРХІЧНА
 СТРУКТУРА
 РОЗРАХУНКОВИХ
 МЕТОДІВ

 ОЦІНЮВАННЯ
 ВОГНЕСТІЙКОСТІ
 ГОРИЗОНТАЛЬНИХ

 ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ
 КОНСТРУКЦІЙ
 ЗА
 НАСТАННЯМ
 ГРАНИЧНОГО

 СТАНУ ВТРАТИ ЦІЛІСНОСТІ
 271

7.3. Висновки до розділу		
ВИСНОВКИ		305
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА		
ДОДАТКИ		
ДОДАТОК А. СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ	ЗA	ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ		345
ДОДАТОК Б. Документи про впровадження		
ДОДАТОК В. Документи про впровадження		
ДОДАТОК Г. Документи про впровадження		
ДОДАТОК Г. Документи про впровадження		
ДОДАТОК Д. Документи про впровадження		
ДОДАТОК Е. Документи про впровадження		

### ВСТУП

*Актуальність теми.* На тлі прискорення технічного та технологічного прогресу у галузі цивільного та промислового будівництва і захисту від надзвичайних ситуацій спостерігається тенденція збільшення кількості пожеж та тяжкості їхніх наслідків. Наприклад, за умови щорічної середньої кількості пожеж біля 85 тис. в Україні втрати у середньому сягають приблизно 3 млрд грн. Така тенденція існує і в інших країнах по всьому світу. Це можна пов'язати із інтенсифікацією будівництва у міських забудовах та їхнім ущільненням. Одним з найбільш важливих завдань пожежної безпеки в цьому випадку є гарантування безпечної евакуації людей шляхом зниження небезпеки впливу чинників пожежі. Водночас має бути забезпечена відповідна вогнестійкість конструкцій, у тому числі з огляду на збереження їхньої цілісності протягом часу, необхідного для евакуації.

Олним 3 найбільш поширених конструкційних матеріалів, який застосовують для улаштування огороджувальних конструкцій, є залізобетон. Поведінка залізобетонних конструкцій під час пожежі добре вивчена і має метолів <u>iii</u> розвинуту систему прогнозування як використанням 3 експериментальних засобів, так і розрахунково-теоретичного підходу. Така система втілена у розвинутій базі міжнародного нормативного забезпечення і базі українських норм зокрема. Цими нормами визначено безпечні рівні показників вогнестійкості та методу аналізу їхніх реальних величин, проте, ця система містить суттєві прогалини стосовно аналізу можливості втрати вогнестійкості огороджувальними залізобетонними конструкціями вогнестійкості з причини настання граничного стану за ознакою втрати цілісності. Це зумовлено технічними труднощями фіксування ознак втрати цілісності під час проведення експериментальних досліджень та недосконалістю критеріальної бази у разі застосування розрахунково-теоретичного підходу.

За таких умов зберігається можливість помилкового оцінювання при аналізу відповідності залізобетонних конструкцій вимогам щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Така ситуація

зумовлює підвищений ризик соціальних втрат як наслідок виникнення додаткової небезпеки проникнення підвищеної температури оточуючого середовища, токсичних продуктів згоряння і термічного розкладання, полум'я та іскри, диму до шляхів евакуації, передчасне поширення пожежі у сусідні приміщення та ін.

Традиційно вважається, що залізобетонні будівельні конструкції мають високу вогнестійкість, що зумовлено повільним прогріванням бетону під тепловим впливом пожежі та відповідно повільною деградацією механічних властивостей бетону і арматурної сталі. Проте існують інші процеси, що стають причиною передчасного утворення наскрізних дефектів, з яким пов'язують настання граничного стану за ознакою втрати цілісності. Такі процеси надзвичайно важко вивчати експериментально та за допомогою математичного моделювання з огляду на недосконалість експериментальних засобів та випадковість і складність фізичних феноменів, які супроводжують ці процеси. Перспективним підходом для цього є застосування розвинутих методів моделювання та створення інженерних методик розрахунку, що узагальнювали б результати такого моделювання. Окремо слід зазначити, що найбільш вразливими до утворення наскрізних дефектів є горизонтальні огороджувальні залізобетонні конструкції, до яких належать залізобетонні порожнисті та ребристі плити.

Дослідженням щодо експериментального та розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних будівельних конструкцій присвячені роботи Фоміна С. Л., Демчини Б. Г., Ватулі Г. Л., Шналя Т. М., Шмуклера В. С., Круковського П. Г., Семерака М. М., Поздєєва С. В., Ніжника В. В., Отроша Ю. А., Lie T., Bartelemi B., Kruppa G., Harmathy T., Shäfer M., Bernhart D., Buchanan A., Bisby L., Kodur V., Lennon T., Fellinger J., Zhao B. та інших дослідників. До оцінювання вогнестійкості нині в основному застосовують два усталених підходи – експериментальний та розрахунково-теоретичний.

Перший підхід, в основі якого лежить проведення вогневих випробувань, які були покликані відтворювати всі значимі фактори впливу пожежі на елемент будівельної конструкції, включаючи тепловий та силовий впливи як результат певного усереднення. Реалізація цього підходу є зразком впорядкованої системи, регламентованої вимогами міжнародних та національних стандартів кожної розвиненої держави. Проте, останнім часом такий підхід піддають обґрунтованій критиці, враховуючи неможливість відтворити всі умови впливу на сучасні конструкції, а також складність у певних випадках інтерпретувати результати досліджень. Крім цього, проведення експериментів вимагає підвищених матеріальних та трудових затрат сукупно із негативним екологічним впливом на довкілля.

розрахунково-теоретичний підхід останнім Інший часом інтенсивно розвиток безпосередньо пов'язаний розвивається і його iз розвитком обчислювальних засобів. Цей метод має всі перспективи повністю витіснити експериментальний підхід, проте він розвинений недостатньо. Це зумовлено обмеженістю теоретичних уявлень про механізми і феноменологію деформування бетону під час термосилового впливу в умовах пожежі. Така обмеженість особливо проявляється під час спроб спрогнозувати наскрізні дефекти в залізобетонних огороджувальних конструкціях, що пов'язані з фіксуванням настання граничного стану вогнестійкості за ознакою втрати цілісності внаслідок теплового впливу пожежі.

Розвитковим підходам, де розвиваються розрахункові методи оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності горизонтальних огороджувальних залізобетонних будівельних конструкцій присвячені роботи Жукова В. В., Ройтмана В. М., Шапіро Г. І., Поздєєва С. В., Шмуклера В. С., Ватулі Г. Л., Демчини Б. Г., Шналя Т. М., Семерака М. М., Zhao B., Buchanan A., Bisby L., Fellinger J., Jansson R., Lim L., Burgess I., Abrams M., Ahmed G., Pettersson O., Magnusson S., Phan L. та ін.

Враховуючи технічні складності для фіксації ознак настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності під час проведення експериментальних досліджень, існує перспектива використання розрахунковотеоретичного підходу з використанням наукоємних математичних моделей феноменології поведінки залізобетону під час теплового впливу пожежі для цих цілей, оскільки такий підхід на поточному рівні свого розвитку дозволяє встановлювати положення тріщин та локальних руйнувань бетону. Цей підхід є універсальним, практично осяжним і таким, що може враховувати всі конструктивні особливості та сполучення граничних умов. Також цей підхід дозволяє розв'язувати такі задачі, проте існують певні недоліки, що ставить під сумнів повсюдне застосування розрахункового-теоретичного підходу у цій модифікації. Вказані недоліки полягають у трудомістких методиках підготовки розрахункових моделей, має бути детально пророблені теоретичні аспекти їхнього застосування, необхідність експериментальної верифікації таких моделей та висока вартість програмного забезпечення та проведення розрахунків.

За таких умов вищеописаний підхід може слугувати ефективним інструментом для створення ієрархічної системи розрахункового оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності конструкцій, горизонтальних огороджувальних зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит як узагальнення результатів розрахунків із використанням цього підходу. Така система могла б бути аналогічна рекомендованій системі розрахункового оцінювання вогнестійкості за настанням граничних станів втрати несучої та теплоізолювальної здатностей у настанові EN 1992-1-2. Науковим підґрунтям для створення вказаної системи могли б бути виявлені закономірності зміни вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності залежно від конструктивних параметрів статично визначених елементів огороджувальних конструкцій, зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит.

Створення ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності, зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит, дозволяє вирішити актуальну науково-технічну проблему, пов'язану із отриманням достовірних і надійних даних щодо їхньої вогнестійкості за настанням цього граничного стану.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Актуальність теми дисертації підтверджено тим, що вона пов'язана із виконанням робіт за наступними програмами:

1) Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державамичленами, з іншої», ратифікованої із заявою Законом № 1678-VII від 16.09.2014,

2) Розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 N 844-р «Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року»;

3) науково-дослідної роботи «Удосконалення експериментальнорозрахункового методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій за результатами випробувань їх малогабаритних фрагментів» (ДР № 0121U109145) в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, в якій здобувач був виконавцем;

4) Науково-дослідної роботи «Удосконалення розрахункових методів прогнозування цілісності залізобетонних конструкцій під час пожежі» (ДР № 0121U109414) в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, в яких здобувач був відповідальним виконавцем.

Ідея роботи полягає у створенні можливості прогнозування утворення тріщин та дефектів у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях в умовах пожежі, що призводить до настання граничного стану втрати цілісності конструкцій шляхом розробки відповідної науково-методичної бази.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – розробка ієрархічної системи методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності на основі математичних моделей та закономірностей утворення тріщин та дефектів в умовах пожежі.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні наукові завдання: 1. Проаналізувати методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі за настанням граничного стану за втратою цілісності та шляхи їхнього удосконалення.

2. Виконати математичне моделювання поведінки фрагменту залізобетонної порожнистої плити для виявлення особливостей механізму руйнування таких будівельних конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою методу скінченних елементів.

3. Дослідити поведінку залізобетонної порожнистої плити в умовах вогневих випробувань для верифікації розробленої математичної моделі з метою виявлення особливостей механізму руйнування у таких плитах під час впливу стандартного температурного режиму пожежі.

4. Розробити математичні моделі для проведення досліджень щодо руйнування залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою методу скінченних елементів.

5. Розробити спрощені методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності на основі створення математичних моделей, які визначають критерії настання граничного стану для залізобетонних порожнистих та ребристих плит.

6. Виявити закономірності утворення наскрізних тріщин у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях залежно від конструктивних параметрів та параметрів впливу пожежі на основі проведених досліджень поведінки залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу пожежі.

7. Розробити ієрархічну систему методів для оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності на основі проведених досліджень поведінки залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу пожежі.

8. Розробити процедуру реалізації розробленої ієрархічної системи методів

для оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності.

**Об'єкт** дослідження – напружено-деформований стан горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, що визначає динаміку порушення цілісності в таких конструкціях в умовах пожежі.

**Предмет дослідження** – процес утворення тріщин та дефектів у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях в умовах пожежі, що призводить до настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності таких конструкцій.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження процесу теплопередачі та термосилової реакції в горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях, зокрема в порожнистих і ребристих плитах, під впливом пожежі проводилися з використанням рівняння нестаціонарної теплопровідності, чисельно реалізованого методом скінченних елементів. Також аналізувався напружено-деформований стан елементів будівельних конструкцій під час пожежі, чисельно реалізований методом скінченних елементів та методом деформаційних моделей. Дослідження настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності в горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях при пожежі проводилися на основі вогневих випробувань порожнистих плит. Для обробки експериментальних даних та верифікації результатів теоретичних досліджень використовувалися методи математичної статистики. Математичні моделі закономірностей впливу конструктивних параметрів горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій (на основі досліджень поведінки залізобетонних порожнистих і ребристих плит) на час досягнення граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності під дією пожежі були створені за допомогою регресійного аналізу.

### Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розкритті механізмів та закономірностей утворення наскрізних дефектів у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях на основі проведених досліджень поведінки залізобетонних порожнистих та ребристих плит залежно від їхніх конструктивних характеристик як наукового підґрунтя для створення ієрархічної системи розрахункових методів оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. При цьому *впереше:* 

1. Виявлено особливості механізму утворення наскрізних тріщин та дефектів у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях на основі моделювання поведінки порожнистої плити в умовах пожежі, які полягають у виникненні поперечних тріщин внаслідок формування призми руйнування в конструкції з кутом при її вершині ~61°, що було експериментально підтверджено та стало передумовою для розробки відповідної математичної моделі, яка дозволяє прогнозувати розвиток утворення поперечних тріщин та/або дефектів наскрізного характеру та вказує про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій.

2. Розроблено метод оцінювання вогнестійкості для залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, що ґрунтується на застосуванні неявного методу інтегрування рівнянь динаміки та рівнянь напружено-деформованого стану таких конструкцій при їх апроксимації методом скінченних елементів, що сприяє обґрунтованому прогнозуванню межі вогнестійкості таких конструкцій та підвищує рівень пожежної безпеки об'єктів.

3. Розроблено математичну модель утворення поздовжніх тріщин та дефектів у порожнистих залізобетонних плитах, що було експериментально підтверджено, яка визначає критерій, за яким порівнюється напруження в розтягнутій зоні стінки між порожниною та верхньою поверхнею плити, з межею міцності бетону на розтяг з урахуванням її зниження через нагрівання, що дозволяють прогнозувати розвиток утворення поздовжніх тріщин та/або дефектів наскрізного характеру та вказує про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій. 4. Розроблено спрощений метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за втратою цілісності на основі математичних моделей, що визначають критерії, які дозволяють прогнозувати утворення наскрізних поперечних і поздовжніх тріщин та дефектів та вказує про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для таких конструкцій в умовах пожежі.

5. Розроблено метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за критерієм втрати цілісності, який базується на математичному моделюванні, що підтверджено експериментальними дослідженнями, та враховує особливості механізму утворення наскрізних тріщин і дефектів, з уточненням геометричної конфігурації руйнування панелі в комірках між ребрами, навіть за умови збереження несучої здатності поздовжніх ребер.

6. Розроблено спрощений метод оцінювання вогнестійкості ребристих залізобетонних плит за ознакою втрати цілісності на основі розробленої математичної моделі для обчислення віртуальних робіт внутрішніх та зовнішніх сил у панелі плити в умовах пожежі, яка включає уточнені данні про геометричну конфігурацію локальної зони руйнування панелі в комірках між ребрами залізобетонних ребристих плит при апроксимації контурів зони руйнування за допомогою ліній Безьє.

7. Отримано проведення повнофакторних експериментів на основі регресійні залежності зміни межі вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності від конструктивних параметрів, що дозволило розробити табличний метод для оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності для порожнистих плит залежно від висоти перерізу (Н) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні плити (w) та для ребристих плит залежно від товщини перерізу панелі між ребрами  $(h_s)$  та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні панелі між ребрами  $(w_s)$ .

### Удосконалено:

8. Науково-методичну базу забезпечення вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності шляхом удосконалення таблиць, які рекомендовані EN 1992-1-2.

### Набуло подальшого розвитку:

9. Застосування номограмних розрахункових методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у створенні наукових основ для розробки методичної бази розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Це відповідно дає можливість підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів шляхом точного визначення відповідності будівельних конструкцій вимогам щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Розроблена методична база може бути підґрунтям для удосконалення системи норм і стандартів для проєктування вогнестійких залізобетонних конструкцій за ієрархічною системою розрахункових методів, запропонованою у цій роботі, яка може бути органічно інтегрована у дані норми.

Розроблені методи апробовані та впроваджені у діяльність ДП «Державний науково-дослідний та проєктно-вишукувальний інститут «НДІпроектреконструкція», ДП «Укрдержбудекспертиза» в Одеській області, а також у проєктні компанії: ТОВ «Незалежний аудит та інспектування сфери безпеки» та ТОВ «КОМФОРТМЕД ПРОЕКТ», ПП «ПроектБудСтар», та в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової проблеми у сфері пожежної безпеки, визначенні мети та завдань дослідження, об'єкту та

предмету досліджень. Автором особисто проаналізовано наукові роботи та нормативну літературу, які є в основній базі посилань і цитувань з теми роботи, розроблено методичну основу для експериментальних і теоретичних досліджень, опрацьовано та оброблено результати досліджень, а також сформульовано висновки. Автор особисто організовував та брав участь у підготовці і проведенні всіх експериментальних досліджень. Усі положення, винесені на захист, та результати досліджень наведено в роботах [1–65], з яких роботи [12, 17, 21, 65] опубліковано здобувачем самостійно.

Особистий внесок здобувача в працях, які написані у співавторстві, полягає у наступному: в роботі [1] розроблено методики проведення обчислювальних експериментів з розподілу температури у двотаврових гофрованих сталевих балках в умовах вогневих випробувань; у роботах [2, 3] створено регресійні залежності для оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит і сходових найбільш кліток відповідно ДО значущих конструктивно-геометричних параметрів; у роботі [4] встановлено закономірності залежності дисперсії температури в камері згоряння печі від визначених параметрів; у роботі [5] розроблено розрахункову модель для проведення обчислювальних експериментів з оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити, виконано обробку результатів та визначено закономірності зміни межі вогнестійкості залежно від рівня механічного В роботі навантаження; [6] проведено комп'ютерне моделювання поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах пожежі та розроблено метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності; в роботі [7] проведено комп'ютерне моделювання поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі та розроблено метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності; в роботі [8] розроблено ієрархічну систему методів оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності для залізобетонних порожнистих та ребристих плит; у роботі [9] виконано комп'ютерне моделювання з метою визначення впливу конструктивних особливостей вертикальної випробувальної установки на

рівномірність розподілу температур у печі за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі; в роботі [10] виконано обробку результатів математичного моделювання розвитку та поширення пожежі у приміщеннях натурної моделі триповерхової будівлі та визначено вплив факторів статистичної роботі [11] похибки експерименту; В розроблено математичну модель температурної й механічної реакції впливу пожежі на будівельні конструкції промислових будівель на основі методу скінченних елементів; у роботі [13] розроблено математичні моделі порожнистих залізобетонних плит в умовах пожежі з метою удосконалення зонного методу оцінювання вогнестійкості таких конструкцій; у роботі [14] розроблено теплові математичні моделі для визначення розподілу температури у залізобетонній ребристій плиті за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі; в роботі [15] проведено дослідження несучої здатності залізобетонної балки в умовах впливу пожежі із застосуванням спрощеної методики зонного методу; в роботі [16] розроблено обчислювальні моделі для розв'язання теплотехнічної та статичної задач щодо визначення напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі; в роботі [18] проведено теплотехнічні та статичні розрахунки для оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити з використанням методу скінченних елементів; у роботі [19] виконано розрахунок напруженодеформованого стану фрагмента залізобетонної порожнистої плити в умовах сумісного розроблений оцінювання термосилового впливу та метод вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності; в роботі [20] розроблено обчислювальну модель для розв'язання теплотехнічної задачі розподілу температури у фрагменті залізобетонної ребристої плити; в роботі [22] проведено дослідження факторів, що впливають на поширення пожежі в будівлях; у роботі [23] оброблено результати математичного моделювання впливу різних температурних режимів пожежі та побудовано номограми для визначення межі вогнестійкості сталевих конструкцій за нормативних значень критичної температури; в роботі [24] встановлено та побудовано регресійну залежність максимальної швидкості обвуглювання та максимального часу

51 процесу обвуглювання дерев'яних конструкцій від найбільш значущих параметрів приміщень, де виникає пожежа; в роботі [25] оброблено результати розподілу температури сталевих колон з вогнезахистом в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі; в роботі [26] розроблено обчислювальні моделі розрахунок оцінювання вогнестійкості горизонтальних та вертикальних сталевих конструкцій за втратою несучої здатності; в роботі [27] вогнестійкості сталезалізобетонних залежності плит від конструктивних параметрів; у роботі [28] розроблено обчислювальну модель напружено-деформованого стану порожнистої плити в умовах пожежі, а також методику розрахунку її руйнування в цих умовах; у роботі [29] розроблено математичні моделі та проведено обчислювальні експерименти щодо визначення вогнестійкості несучих стін; у роботах [30, 31] проведено обчислювальні експерименти дослідження рівномірності прогрівання несучої залізобетонної стіни під час її випробувань на вогнестійкість; у роботах [32, 33] розроблено математичні моделі для визначення конфігурації вертикальної випробувальної печі з найбільш рівномірним розподілом температур; у роботі [34] виконано моделювання процесів нестаціонарного теплообміну під час випробувань залізобетонних конструкцій на вогнестійкість; у роботах [35, 36] проведено дослідження впливу конструктивних параметрів камер вогневих печей на

проведено

встановлено

та

адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість; у роботі [37] проведено дослідження щодо настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності електричної шафи запорізької атомної електричної станції в умовах пожежі; в роботі [38] проведено дослідження щодо перевірки вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на впливу вогнестійкість вертикальних конструкцій; у роботі [39] взято участь у розробленні математичної моделі прогнозування прогресуючого руйнування в будівлях із залізобетонними конструкціями; в роботі [40] взято участь у розробленні методики дослідження впливу конструктивних параметрів гнучких елементів огорожі в умовах вибуху; в роботі [41] взято участь у розробленні математичної моделі прогресуючого руйнування для каркасів будівель; у роботі [42] проведено

впливу залежності між дослідження щодо виявлення значенням межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій і дисперсією температур на їхніх обігрівальних поверхнях; у роботі [43] визначено вплив вимірювальних достовірність випробувань приладів результатів на вогнестійкість на вертикальних конструкцій; у роботі [44] взято участь у розробці скінченноелементної моделі для проведення досліджень впливу пожежі на сталеві конструкції; В роботі [45] розробленні взято участь У методики експериментальних досліджень поведінки дерев'яної балки із вогнезахистом в умовах впливу пожежі; в роботі [46] розроблено обчислювальну модель для проведення досліджень впливу на показники значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій від дисперсії температур; у роботі [47] розроблено обчислювальну модель для проведення досліджень розподілу температури в залізобетонній плиті перекриттів за допомогою методу скінченних елементів; у роботі [48] проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит в умовах пожежі; в роботі [49] взято участь у розробленні методики проведення повнофакторного експерименту щодо вивчення впливу пожежі в кабельних тунелях; у роботі [50] взято участь у розробленні обчислювальних моделей розподілу температури по сталезалізобетонній плиті в умовах пожежі; в роботі [51] взято участь у розробці методики проведення експериментальних досліджень оцінювання межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу; в роботі [52] розроблено спрощенний розрахунковий метод оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити; в роботі [53] розроблено скінченно-елементну модель для дослідження розподілу температури у сталевій балці; в роботі [54] проведено дослідження розподілу температури в залізобетонній колоні в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі; в роботі [55] проведено обчислювальні експерименти з оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за допомогою методу скінченних елементів; у роботі [56] обчислювальну розроблено модель та проведено розрахунок розподілу температури в залізобетонній ребристій плиті в умовах пожежі; в роботі [57] розроблено скінченно-елементну модель оцінювання вогнестійкості для

залізобетонних плит в умовах впливу параметричних температурних режимів пожежі; в роботі [58] розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів для оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити; в роботі [59] проведено дослідження механізму руйнування залізобетонної порожнистої плити в умовах пожежі; в роботі [60] проведено дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити під час оцінювання вогнестійкості за втратою несучої здатності; в роботах [61, 62] розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів та проведено розрахунок оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити; в роботах [63, 64] розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів та проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на: Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія, практика, інновації» (м. Львів, 2016); Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників (м. Київ, 2017); VII Міжнародній науково-практичній конференції (м. Чернігів, 2017); XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in mettalurgy. material engineering, production engineering physics» and (Czestochowa, 2017); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2017); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2017); 6th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Kharkiv, 2017); Всеукраїнській науково-практичній конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика» (м. Черкаси, 2018); XIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2018); 7th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway

Transport Engineering Structures and Buildings» (Kharkiv, 2018); IOP Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Kharkiv, 2019); XI Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2020); Х Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2020, 2021, 2023, 2024); конференції «Проблеми Міжнародній науково-практичній надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2020, 2022, 2023); International Scientific Conference «Energy Efficiency in Transport» (Kharkiv, 2021); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2021); Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів, 2022); ІХ Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2022); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та забезпечення цивільного Харків, перспективи захисту» (м. 2023); XIII Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю (м. Черкаси, 2023); 9th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Kharkiv, 2021); XIX Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2024); X Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2024); XV Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2024); XIII науковій конференції «Наукові підсумки» (м. Харків, 2024).

Публікації. Основні положення й наукові результати дисертації опубліковано в 65 наукових роботах, серед яких: 2 монографії, 27 статей у наукових виданнях, з них 12 статей у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus, 13 статей у наукових фахових виданнях

України, 7 статей які додатково висвітлюють наукові результати дисертації, 36 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних та вітчизняних наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 303 найменувань та 7 додатків. Загальний обсяг роботи становить 361 сторінка друкованого тексту, з них обсяг основного тексту – 272 сторінки, 128 рисунків, 43 таблиці.

## РОЗДІЛ І АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ РОЗРАХУНКОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

# 1.1. Аспекти сучасного нормування вогнестійкості залізобетонних конструкцій

Залізобетонні конструкції є одним з найбільш поширених типів будівельних конструкцій. Повсюдне їхнє застосування зумовлене перевіреним часом та широким досвідом їхнього використання у будівництві. Серед їхніх переваг, зокрема, можна вказати на міцність, технологічність, довговічність, порівняно невелика вартість та ін. До їхніх переваг також слід віднести універсальність при здійсненні огороджувальних та несучих функцій, а також високу вогнестійкість, зумовлену специфічними властивостями бетону як матеріалу. Останнє пояснює підвищений інтерес до вогнестійкості залізобетонних конструкцій з боку науковців, що здійснюють дослідження у галузі пожежної безпеки будівельних конструкцій. За всю історію експлуатації залізобетонних конструкцій накопичився великий обсяг загальних та спеціальних наукових знань стосовно поведінки залізобетонних конструкцій під час пожежі та прогнозування втрати ними функціональної придатності як наслідок теплового впливу пожежі. Отриманий обсяг знань у цій галузі знайшов своє впровадження у системі національних нормативних документів держав світу і національних нормах України, що також орієнтовані на загальні світові норми.

Умовно нормативну базу можна розділити на декілька груп, які належать до різних аспектів галузі нормування вогнестійкості залізобетонних конструкцій. На рис. 1.1 наведена структурна схема нормативної бази, що регламентує основні аспекти у галузі вогнестійкості залізобетонних конструкцій [1–25].

З рис. 1.1 видно, що нормативна база має свою ієрархію, підґрунтям для якої є міжнародні стандарти, які визначають базовий підхід до встановлення кількісних параметрів і встановлюють узагальнені методи схематизації впливу пожежі на будівельні конструкції.



Параметри теплового впливу пожежі. Описання температурного режиму пожежі Параметри механічного навантаження на будівельні конструкції при пожежі

Норми, що встановлюють параметри впливу пожежі на будівельні конструкції

Основні визначення та термінологія щодо базових понять вогнестійкості Класифікація будівель та споруд з точки зору їхньої вогнестійкості Визначення якісних та числових <u>характе</u>ристик вогнестійкості конструкцій



Рис. 1.1. Ієрархічна структура регламентних норм щодо вогнестійкості будівельних конструкцій

Базові нормативні документи [1–7] дають рекомендації для встановлення необхідних вимог щодо вогнестійкості з огляду на функціональне призначення, архітектурні та конструктивні особливості, відповідальність та інші особливості певної будівлі. Для цього вводять систему основних означень, термінології та кількісних характеристик щодо вогнестійкості будівельних конструкцій. Крім цього, вводяться ознаки та критерії, що встановлюють стан втрати будівельними конструкціями своїх кондицій, які пов'язані із умовами збереження їхньої вогнестійкості. На базі таких документів створена ієрархічна ланка нормативних документів [8–10], що встановлюють параметри впливу пожежі на будівельні конструкції, зокрема тепловий вплив пожежі та рівень механічних навантажень на будівельні конструкції під час пожежі.

Нормативні документи третьої ієрархічної ланки [11–25] містять рекомендації щодо проведення оцінювання вогнестійкості за параметрами, встановленими базовими нормами. При цьому використовують два принципово різні типи методів оцінювання – розрахунковий та експериментальний, що визначає розподіл цих нормативних документів на відповідні групи.

На рис. 1.2 наведена структура нормативної бази, яка є чинною в Україні.

### Стандарти визначення вимог щодо вогнестійкості

ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об`ектів будівництва. Загальні вимоги



Рис. 1.2. Система стандартів, які визначають основні регламентні норми щодо вогнестійкості в Україні

Структурна схема на рис. 1.2 показує, що ієрархія нормативних документів, чинних в Україні, зберігає порядок, відображений на схемі рис.1.1. Крім того, основні нормативні документи або базуються на світових та європейських стандартах, або імплементовані у структуру норм України з пожежної безпеки об'єктів будівництва.

# 1.2. Критеріальна база для оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій

Пожежі у будівлях, зведених на основі залізобетонних конструкцій, через які відбувається їхнє руйнування, мають досить низьку імовірність порівняно із іншими руйнівними впливами, які є загальними для будівництва. Можна вважати серйозними наслідки від пожеж, випадки коли можуть бути досягнуті граничні стани у одній або декількох конструкціях, з'явитися великі пластичні деформації, порушення стійкості окремих елементів або часткове обвалення. Для розв'язання проблеми прогнозування вогнестійкості залізобетонних конструкцій на початкових етапах розвитку методів її вирішення було не зовсім достатньо ефективних засобів та інструментів. Фактично, найбільш ефективним був експериментальний підхід. За достатньо розвиненої теорії теплових та механічних процесів у конструкціях під час пожежі остання не мала підходів щодо її інженерного застосування [26-28]. В наш час із розвитком обчислювальної техніки та відповідного програмного забезпечення ситуація змінилася на ліпше, але мінливість процесів, що відбуваються під час пожежі, різноманітність будівельних об'єктів під сумнів застосування ставлять традиційного детерміністичного підходу для розв'язання цієї проблеми. Більшість факторів пожежі, що визначають пожежну безпеку об'єктів будівництва, є перемінними за своєю природою. З огляду на низьку передбачуваність процесів під час пожежі не можна спроєктувати таку будівлю, в якій був би забезпечений нульовий ризик утворення та негативного впливу пожежі. Проте можна вжити певних технічних заходів для зниження ризиків утворення та негативних наслідків пожеж. Сюди можна віднести архітектурні, інженерні, інфраструктурні, інформативні та інші заходи. Практичний досвід, що заснований на ґрунтовних наукових дослідженнях дозволив створити будівельні норми, положення яких наразі є ключовими інструментами для керування пожежними ризиками пожежної безпеки у будівництві, проте вони потребують певної ревізії з точки зору введення у них стохастичних пілхолів до встановлення впливу небезпечних факторів,

прогнозування поведінки конструкцій та прогнозування наслідків пожеж. До основних ризиків під час пожежі слід віднести вплив небезпечних факторів пожежі, наявність небезпечних наслідків та небезпечну обстановку на пожежі [26–32], пов'язана із панічними проявами, утрудненнями під час евакуації тощо. Зберігання своїх функціональних здатностей будівельними конструкціями при їхній аварійній роботі під час пожежі взаємно пов'язує дію цих трьох перелічених вище факторів. Серед небезпек через втрату своїх кондицій будівельними конструкціями слід відмітити повне або часткове їхнє руйнування, втрату здатності ізолювати небезпечні чинники пожежі, поширювати горіння, бути джерелом або провідником димових газів та токсичних продуктів згоряння. Зважаючи на це, небезпечними наслідками таких факторів є загроза життю та здоров'ю людей, втрата матеріальних цінностей, шкода довкіллю тощо. Однак кожна із зацікавлених сторін по-різному оцінює ризик небезпечних наслідків пожежі. Тож мають бути єдині підходи до оцінювання пожежних ризиків будівельних об'єктів та до способів керування цими ризиками.

З огляду на те, що пожежних ризиків не можна повністю виключити, основним завданням керування пожежними ризиками на будівельних об'єктах є зниження їх до певного прийнятного значення. Цьому питанню було присвячено багато робіт [28–32]. Проте це завдання і нині залишаться актуальним, оскільки кожен із запропонованих підходів має свої певні недоліки та застереження. Все ж, аналіз цих робіт дозволяє сформулювати основні принципи, що зокрема дають змогу обґрунтувати такі значення. До таких принципів належать:

- типи процесів, які є допустимими у разі певного типу діяльності;

- рівень матеріальних витрат, що є допустимими для здійснення заходів щодо зниження пожежних ризиків;

- рівень втрат, що є допустимими у випадку підвищення пожежного ризику.

З точки зору людей, які живуть або працюють у будівлі, будь-який ризик є неприпустимим, однак власники та забудовники зацікавлені у пом'якшенні вимог щодо величин припустимих ризиків. Враховуючи сучасну статистику [28–32], доцільно встановлювати індивідуальний допустимий ризик для людини з огляду

на смертельні випадки у випадку перебігу найбільш поширених і найбільш небезпечних захворювань, зокрема серцево-судинних та/або онкологічних захворювань. Статистика смертельних випадків серед здорового населення країн із високим рівнем життя за таких умов становить приблизно 1 випадок на 1 000 осіб на рік. З іншого боку, в роботах [28–32] зазначено, що кількість смертельних випадків за певних умов, за якої зазвичай не потрібно вживати окремих спеціальних заходів, становить приблизно 1 випадок на 10 000 000 осіб на рік. Між цими щорічними статистичними показниками існує сіра зона, у якій можна ідентифікувати значення прийнятного ризику як статистичний еквівалент кількості смертельних випадків на рік унаслідок небезпечних природних і техногенних чинників, у тому числі небезпечних чинників пожежі. Такими міркуваннями обумовлене значення прийнятного ризику [28] за таким статистичним показником як величина 1 випадок на 10 000 000 населення за рік. Розв'язання завдання встановлення прийнятного ризику полягає у створенні осяжних розрахункових методик його оцінювання. Математично поняття ризику пов'язане із величинами ймовірностей тієї чи іншої події, що може трапитися в процесі впливу пожежі на будівельні конструкції, наприклад поява ушкоджень, обвалень або інших наслідків. У роботах [30–32] запропоновано визначати ризик небезпек, пов'язаних із впливом пожежі на будівельні конструкції за формулою:

$$P_{A} = \Sigma_{H} \Sigma_{LS} \Sigma_{D} P[L > \Theta | D] \cdot P[D | LS] \cdot P[LS | H] \cdot P[H], \qquad (1.1)$$

де  $P[L > \Theta | D]$  – ймовірність перевищення втрат L значення прийнятного значення у разі появи ушкоджень будівельних конструкцій;

*P*[*D*|*LS*] – ймовірність появи фатальних ушкоджень після досягнення одного з граничних станів вогнестійкості;

*P*[*LS*|*H*] – ймовірність досягнення одного з граничних станів вогнестійкості, якщо зафіксовано небезпечні чинники пожежі із критичними показниками;

*P*[*H*] – ймовірність досягнення параметрами небезпечних чинників пожежі критичних значень.

Ймовірність досягнення параметрами небезпечних чинників пожежі критичних значень *P*[*H*] визначається за функцією інтенсивності цієї події, яка називається кривою параметра небезпечного чинника [28–32].

За іншим підходом оцінювання пожежного ризику базується на наборі попередньо окреслених сценаріїв пожежі, узгодженими із експертними зауваженнями. Кожен з таких сценаріїв передбачає перебіг пожежі від її ініціації упродовж найбільшого розвитку до її згасання із врахуванням всіх найбільш значущих особливостей пожежі, які можуть бути окреслені для певного типу будівлі. При використанні такого підходу пожежний ризик для будівельних конструкцій визначається за формулою [28–32]:

$$P_{h} = \Sigma_{LS} \Sigma_{D} P[L > \Theta | D] \cdot P[D | LS] \cdot P[LS | H_{s}].$$
(1.2)

Тут  $P[LS|H_s]$  – ймовірність настання граничного стану втрати вогнестійкості за умови перебігу пожежі за одним із її сценарієм з  $H_s$  набору.

Рівняння (1.1) та (1.2) показують як можна розкласти на найбільш значущі складові загальний ризик під час його аналізу, водночас фокусуючись на стратегічно важливих питаннях для його зниження, чим досягають балансу між відповідним рівнем ризику та економічними аспектами. Ймовірність досягнення параметрами небезпечних чинників пожежі критичних значень, зумовлену показником P[H], вимірюється статистичними річними показниками відповідних випадків ураження людей на пожежах. Ймовірності  $P[LS|H_s]$ , P[LS|H]визначаються шляхом інженерного аналізу задач міцності та стійкості конструкцій. Ймовірність P[D|LS] визначається за результатами аналізу можливості настання граничних станів при визначенні набору даних щодо напружено-деформованого стану під час нагрівання в процесі пожежі. При цьому обидва підходи дають свої переваги та недоліки в окремих випадках [28–32]. Перший підхід з використанням формули (1.1) доцільно використовувати при оцінюванні ризику для певної кількості подій, що відбуваються протягом певного часу із одночасним аналізом втрат із використанням прогнозних даних за статистичними щорічними даними. Інший підхід, заснований на використанні рівняння (1.2), зазвичай застосовується при врахуванні відносно невеликої кількості небезпечних ситуацій, пов'язаних із пожежами, кожна з яких може бути описана за умови врахування певної деталізації [28–32]. Такий підхід дозволяє сфокусуватись на подіях, що можуть бути частково важливими у відповідних типах будівель. Однак, ймовірність кожного сценарію рідко обчислюється. Таким чином, ймовірності у рівнянні (1.2) умовні за своєю природою і у кінцевому підсумку ймовірність втрат не може спиратися на щорічну статистику або порівняльний аналіз поряд із звичайними ризиками, не пов'язаними із пожежами.

Основною характеристикою у випадку такого аналізу є величина прийнятного ризику Р<sub>A</sub>. При визначенні цього показника спочатку враховується аспект збереження життя та здоров'я людей, а вже потім ймовірність матеріальних втрат. Попри те, що висловлена думка стосовно будівель, зведених на основі залізобетонних конструкцій, про низьку ймовірність їхнього обвалення до моменту локалізації пожежі у їхньому внутрішньому просторі, врахування їхньої пожежної небезпеки стикається із невизначеністю у разі врахування ймовірності небезпечного впливу інших чинників пожежі, таких, як поява токсичних газів, які є продуктами згоряння, зменшення видимості, локальне підвищення температури, поширення горіння на суміжні приміщення тощо. Це підкреслює важливість аналізу ризику пожежної небезпеки будівельних конструкцій з точки зору їхньої вогнестійкості у кожному випадку окремо. Аналіз невизначеностей при аналізі ризику пожежної небезпеки у будівлях із залізобетонними конструкціями має бути заснований на вивченні джерел таких невизначеностей, до яких належать [28]:

- найбільш імовірний сценарій пожежі;
- щільність пожежного навантаження;
- наявність вентиляції у пожежних відсіках;
- прогнозні дані щодо поведінки будівельних конструкцій під час пожежі, отримані на основі інженерних розрахунків або математичного моделювання;

- теплофізичні та механічні властивості сталі та бетону;
- відповідні дані щодо механічних в'язів та діючого навантаження під час пожежі.

При аналізі невизначеностей існують два базових підходи – алеоторичний та епістемологічний [28–32]. Перший підхід заснований на представленні параметрів, пов'язаних із зазначеними невизначеностями, у вигляді випадкових характеристик, які не можуть бути зведені до абсолютних значень у подальшому аналізі. Інший підхід використовує для аналізу та осяжності невизначеностей за допомогою детерміністичних математичних моделей, що використовують середньостатистичні показники їхніх компонентів, визначених з практичного досвіду та наперед оціненою вірогідністю помилкового оцінювання ризику за цими моделями [28–32]. При цьому, для оцінювання ризику фатальних ушкоджень залізобетонних конструкцій застосовується значення прийнятного ризику, що становить 100 000 випадків на рік.

Для застосування вищезазначених підходів під час аналізу пожежного ризику будівель із залізобетонними конструкціями поява таких випадкових і відносно рідкісних подій, як пожежа, описується за допомогою розподілу Пуассона. За таких умов вірогідність, що відбудеться певна кількість пожеж у будівлях із залізобетонними конструкціями протягом певного періоду часу  $\Delta t$  [28–32]:

$$\mathbf{P}_{N} = (\lambda \Delta t)^{N} \exp(-\lambda \Delta t) / N, \qquad (1.3)$$

де *λ* – усереднений коефіцієнт появи події у розподіленні Пуассона;

N – кількість випадків пожежі у заданий інтервал часу  $\Delta t$ .

Якщо випадки пожежі є достатньо рідким явищем, вірогідність появи пожежі у проміжок часу  $\Delta t$  приблизно дорівнює  $\lambda \Delta t$ . З іншого боку, щорічна ймовірність та частота випадків пожежі приблизно дорівнює  $\lambda_{Fire}$ .

Імовірність загоряння може бути описана за допомогою розподілення Пуассона із усередненим коефіцієнтом появи загоряння, який пов'язаний із

площею протипожежного відсіку *A<sub>f</sub>*. Деякі значення цього коефіцієнта наведені у табл. 1.1 відповідно до [28, 33].

### Таблиця 1.1

Функціональне	Середній коефіцієнт,	Вірогідність пожежі із
призначення	×10 <sup>-6</sup> /м <sup>2</sup> /рік	важкими наслідками
будівлі		
Офісні	1÷2	$10^{-3} \div 10^{-2}$
Житлові	2÷5	10-1
Готелі	0.5	$10^{-3} \div 10^{-2}$
Торгові	1.0	10-2
Навчальні	0.5	10-3

Показники імовірності виникнення пожеж із можливістю суттєвих наслідків

Величини, представлені у табл. 1.1, є ілюстрацією того, яким чином функціональне призначення тієї чи іншої будівлі може впливати на імовірність появи пожежі із серйозними наслідками для їхніх приміщень. Згідно з табл. 1.1, середній коефіцієнт розподілу Пуассона появи пожеж із серйозними наслідками у будівлях із найбільш поширеними призначеннями сягає від  $1 \times 10^{-6}$ /м<sup>2</sup>/рік до 0,5×10<sup>-6</sup>/м<sup>2</sup>/рік. У загальному випадку цей коефіцієнт пропорційний площі протипожежного відсіку, проте, у випадку коли протипожежний відсік має велику протяжність і містить велику кількість нерівномірно розподіленого пожежного навантаження він стає пропорційним до  $A_f^{0.5}$ . Окрім площі протипожежного відсіку, кількості та розташування пожежного навантаження існують інші фактори. До них слід віднести вік будівлі та рівень її доглянутості [34], які не можуть бути відображені у таблицях, подібних до табл. 1.1. Коефіцієнт виникнення пожежі із серйозними наслідками також суттєво може залежати від надійності роботи систем пожежної автоматики у разі її спрацювання. Відповідно до результатів, наведених у роботі [35], при коефіцієнті спрацювання пожежної автоматики 0,9÷0,95, імовірність, що пожежа пошириться та заповнить все приміщення, становить 0,01.

Нині нормами багатьох [1–10] встановлено основні ознаки, що визначають зберігання елементами будівельних конструкцій своїх кондицій під час пожежі, за якими встановлюється вогнестійкість для цих елементів. Умовно такі ознаки описують граничні стани, через настання яких ідентифікується стан втрати вогнестійкості елементів будівельних конструкцій. Всього встановлюють три основні граничні стани: втрата несучої здатності, втрата теплоізолювальної здатності та втрата цілісності.

Відповідно, час настання вищевказаних граничних станів і є нормованим параметром. Час у хвилинах до настання одного з граничних станів для певного елемента будівельної конструкції має бути меншим або дорівнювати значенню, яке встановлене класом вогнестійкості. Граничні стани, настання яких унормовано у певному класі вогнестійкості, позначають літерами R (граничний стан втрати несучої здатності), I (граничний стан втрати теплоізолювальної здатності) та Е (граничний стан втрати цілісності). Для елементів будівельних конструкцій із виключно несучими функціями регламентують тільки граничний стан втрати несучої здатності. Для елементів будівельних конструкцій із виключно огороджувальними функціями зазвичай регламентують граничні стани за ознаками втрати цілісності та теплоізолювальної здатності. Для залізобетонних огороджувальних конструкцій, які, як правило, поєднують несучі та огороджувальні функції, регламентують настання всіх трьох основних граничних станів. Настання граничного стану втрати несучої здатності елементами залізобетонних конструкцій фіксують за ознаками втрати стійкості або руйнування. Ознаками руйнування [18-25] є випучування та заголення робочої арматури, досягнення критичних значень максимальної деформації та швидкості її нарощування, повне, або часткове ушкодження поверхневого шару бетону.

Граничний стан втрати теплоізолювальної здатності фіксується у разі появи ознак, за яких температура на необігрівній поверхні елемента огороджувальної

конструкції протягом часу впливу пожежі підвищується на 140 °С, або в певній будь-якій точці цієї поверхні температура підвищується на 180 °С [18–25].

Згідно із вимогами стандартів [18–25] настання граничного стану з вогнестійкісті за ознакою втрати цілісності супроводжується такими ознаками: загоряння або тління зі свіченням ватного тампона, що піднесений до необігрівної поверхні зразка в місця тріщин на відстань від 20 мм до 30 мм протягом проміжку часу не менше ніж 30 с; виникнення тріщини, через яку можна вільно (без додаткових зусиль) ввести в піч щуп діаметром 6 мм і перемістити його вздовж цієї тріщини на відстань не менше 150 мм; виникнення тріщини (або отвору), через яку можна вільно ввести в піч щуп діаметром 25 мм; полум'я на необігрівній поверхні зразка спостерігається протягом проміжку часу не менше ніж 10 с.

Всі перелічені ознаки настання граничних станів втрати вогнестійкості є тобто такими, що можна зафіксувати візуально В процесі прямими, експериментальних досліджень. У разі застосування розрахункових методів такі ознаки можна зафіксувати лише за умови використання критичного значення підвищення температури на 140 °С при аналізі втрати теплоізолювальної здатності за спрощеними методами, рекомендованими стандартами [11-13, 15, 16], а у випадку застосування уточнених підходів на основі використання методу скінченних елементів з врахуванням нелінійних ефектів для граничних станів та теплоізолювальної здатності. Стосовно втрати несучої аналізу щодо граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності огороджувальних залізобетонних конструкцій застосування таких методів є дуже обмеженим.

Враховуючи такий стан, можна сказати, що для оцінювання вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності для залізобетонних конструкцій безальтернативним є застосування експериментальних методів на основі проведення вогневих випробувань. У такому разі треба зважити на високі вартість та трудомісткість такого підходу, це зумовлено складністю та тривалістю проведення підготовчих робіт та безпосередньо процесів вогневих випробувань. Така обставина пояснює підвищений інтерес до розвитку розрахункових методів оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати

цілісності.

### 1.3. Формалізація теплової дії пожежі на залізобетонні конструкції

Повсюдно визнаним є те, що найбільш деструктивним фактором щодо будівельних конструкцій під час пожежі є тепловий вплив [26–38]. Відомо, що під час пожежі можуть бути досягнуті високі величини температур до 1 000 °С і більше. Для багатьох будівельних матеріалів, зокрема залізобетону, високі температури спричиняють незворотні зміни у його внутрішній структурі, що значно послаблює опір діючим навантаженням. При цьому унаслідок утворення великої кількості дефектів та тріщин порушується виконання огороджувальних функцій залізобетонними будівельними конструкціями. Тож з викладеного випливає досить очевидний висновок, що величина та характер зміни температури у приміщенні із пожежею є основним чинником, орієнтуючись на який. прогнозувати вогнестійкість залізобетонних будівельних можна конструкцій.

архітектурно-конструктивних різноманітність Велика рішень, функціонального призначення та типу будівельних об'єктів визначає таку ж саму різноманітність перебігу пожеж у внутрішніх приміщення цих об'єктів та назовні. Зрозуміло, ШО для прогнозування температурних показників пожежі у конкретному випадку потрібно врахувати багато особливостей та факторів, до яких можна віднести сценарій можливої пожежі, розподіл та кількість пожежного навантаження згідно із таким сценарієм у протипожежних відсіках, теплотворну здатність такого пожежного навантаження, об'єм, конфігурацію приміщень, де може виникнути пожежа, у рамках протипожежних відсіків, тип матеріалів огороджувальних конструкцій, розташування, геометричну конфігурацію та площу прорізів у приміщеннях протипожежного відсіку, тип наявної вентиляції, у тому числі протипожежної, тип наявних автоматичних вогнезахисних систем та iн.

Такий стан зумовлює необхідність застосовувати складні математичні

моделі тепломасообміну та проведення великого обсягу обчислень за цими моделями. Це суттєво вплинуло на рішення відмовитися застосовувати уніфікований підхід, заснований на введенні універсальної моделі еталонної або «ідеальної» пожежі, що узагальнює великий досвід спостереження за пожежами. Застосування такого підходу може бути резонним з огляду на введення достатнью жорстких умов пожежі, що може бути вичерпним для описання більшості пожеж, що не мають виходити за встановлені температурні показники. Отже, у багатьох випадках пожежі відбуваються за значно м'якших умов. Серед таких підходів слід виділити два дуже схожих, за якими для описання теплового впливу пожежі запропоновано використовувати уніфіковану температурну криву, що описує середньооб'ємну температуру у приміщенні із пожежею, залежно від часу її перебігу. У міжнародних нормах ISO 834 [8] та американських національних нормах ASTM E119 [38] рекомендовано використовувати майже однакові температурні криві. Температурну криву, рекомендовану ISO 834, яка також є стандартним температурним режимом пожежі, визначають за формулою:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t/60+1) + \theta_0,$$
(1.4)

де: *t* – поточний час розвитку пожежі, с;

 $\theta_0$  – початкова температура у приміщенні до пожежі, °C;  $\theta_0 \approx 20$  °C;

 $\theta_p(t)$  – середньооб'ємна температура у приміщенні під час пожежі, °С.

Формула для описання температурної кривої за рекомендаціями ASTM Е119 має такий вигляд:

$$\theta_p(t_h) = \theta_0 + 750 \left( 1 - exp\left( -3.79533 \sqrt{t_h} \right) \right) + \sqrt{t_h} , \qquad (1.5)$$

де  $t_h$  – поточний час теплового розвитку пожежі у годинах.

Також такий підхід застосований для узагальнення теплового впливу специфічних пожеж, таких як, зовнішні пожежі або пожежі на нафтозберігальних та нафтопереробних підприємствах, які ще називають вуглеводневими пожежами [39–42]. На рис. 1.3 наведені графіки, що представляють описані вище температурні режими пожеж.

Слід звернути увагу на характерні особливості цих температурних режимів пожежі, які ще називають номінальними. Умови таких пожеж досить суворі, оскільки майже за 10 хв температура сягає 600 °C. Окрім цього, такі температурні режими пожеж не мають ділянки спадання. Це позначається на виникненні дуже великих запасів вогнестійкості у разі застосування такого вогневого впливу пожежі.



Рис. 1.3. Температурні криві різних типів пожеж

Наступне місце у ієрархії методів описання теплового впливу пожеж займають методи, які встановлюють параметричні температурні криві, що враховують конкретні умови у будівлі шляхом введення найбільш значущих параметрів, які впливають на тепловий ефект пожежі. Прикладом такого підходу є рекомендований у нормах [10–15] та описаний у роботах [41–46] параметричний режим пожежі, описаний нижче.

Параметричний режим пожежі на стадії розвитку визначається функцією, що має вигляд виразу:

$$\Theta_g = 20 + 1325 \ (1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-1.9t^*}). \tag{1.6}$$

Тут параметри цієї функції визначаються через вирази: приведений час розвитку пожежі:

$$t^* = t_h \times \Gamma; \Gamma = (O/b)^2 / (0.04/1160)^2,$$
 (1.7)

де *О* – коефіцієнт прорізів в огородженні приміщення та визначається за формулою:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq} / A_t}, \tag{1.8}$$

де  $A_v$  – площа прорізів у вертикальних огороджувальних конструкціях, м<sup>2</sup>;  $h_{eq}$  – усереднена висота прорізів у вертикальних огороджувальних конструкціях, м;

А<sub>t</sub> – повна площа огороджувальних конструкцій приміщення із пожежею;

*b* – термічний опір матеріалів огороджувальних конструкцій, який обчислюється за виразом:

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} , \qquad (1.9)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу огороджувальних конструкцій, кг/м<sup>3</sup>;

*с* – питома теплоємність огороджувальних конструкцій, Дж/кг.°С;

 $\lambda$  – теплопровідність огороджувальних конструкцій, Вт/м·°С.

Максимальний час розвитку пожежі визначається за формулою:

$$t_{\rm max} = 0,0002 \times q_{t,d} / O. \tag{1.10}$$

Розрахункове питоме пожежне навантаження визначається за формулою:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \times m \times \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_{qn,} \tag{1.11}$$

де *m* – коефіцієнт повноти згоряння;

δ<sub>q1</sub> – коефіцієнт урахування ризику виникнення пожежі, що залежить від розмірів протипожежного відсіку;

δ<sub>q2</sub> – коефіцієнт урахування ризику виникнення пожежі залежно від призначення приміщення;

 $\delta_{qn}$  – коефіцієнт, що враховує наявність спеціальних заходів (протипожежних заходів) для гасіння пожежі (для звичайних рішень протипожежних заходів коефіцієнт – 1,0. Якщо протипожежні заходи не передбачені, коефіцієнт – 1,5);  $q_{f,k}$  – нормативне пожежне навантаження, приведене до площі поверху, МДж/м<sup>2</sup>.

Параметричний режим пожежі на спадній гілці визначається за функцією:

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625(t^* - t^*_{\max} \times X), \qquad (1.12)$$

де  $\Theta_{\text{max}}$  – максимальна температура розвитку пожежі (°С); X – параметр, що враховує вплив прорізів на спадаючій гілці.

Більш точним вважають підхід описання температурних режимів теплового впливу пожежі, що заснований на зонних моделях, описаний у роботах [47–54]. Цей підхід заснований на визначенні температурного режиму пожежі на основі запису рівнянь теплового балансу між окремими зонами у приміщенні із пожежею. Існують дві основні моделі – двозонна та трьохзонна.

Найвище місце за точністю та гнучкістю в ієрархії підходів щодо визначення температурного режиму пожежі займають методи, засновані на використанні польових моделей, що будуються у результаті застосування повної
системи диференціальних рівнянь термогазодинаміки Нав'є-Стокса. Такий підхід добре описаний у роботах [71–73].

### 1.4. Експериментальний підхід до оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій

Експериментальний підхід щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій заснований на проведенні вогневих випробувань, які реалізуються в спеціальних установках із дотриманням вимог відповідних стандартів [18–25]. Згідно із таким підходом досліджувані елементи несучих та огороджувальних залізобетонних конструкцій піддають тепловому впливу з боку факелів у вогневій печі у комбінації із прикладенням до елементів досліджуваних залізобетонних конструкцій механічного навантаження, що має відповідати діючому навантаженню з врахуванням всіх проєктних даних конструкторської документації. Механічне навантаження прикладають гравітаційним способом з використанням попередньо встановлених тягарів. Це можуть бути бетонні блоки, мішки із піском, або іншими сипучими матеріалами, сталевим прокатом тощо. В іншому випадку механічне навантаження може бути прикладене за допомогою гідравлічних домкратів.

Тепловий залізобетонних вплив пожежі конструкцій на елементи відбувається під час нагрівання простору вогневої печі за рахунок спалювання рідкого пального у факелах. У якості рідкого пального застосовується гас, мазут або дизельне пальне. У деяких випадках для формування факелу використовується природний газ. Температурний режим за відсутності особливих вимог має відповідати стандартному температурному режимові пожежі. На рис. 1.4 показана схема вогневих випробувань горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій.

Установка для вогневих випробувань елементів залізобетонних конструкцій у загальному випадку складається з вогневої печі та огородження, яке є її основою. Огородження печі має бути достатньо міцним, щоб витримувати навантаження, які можуть бути прикладені до досліджуваного елементу залізобетонної конструкції у вигляді тягарів, які встановлені на нього, або тиску гідравлічних домкратів. Як правило, вогневу піч оснащують системою форсунок, комбінованою із системою надходження палива та системою електронного керування. Система керування об'єднана із контрольно-вимірювальною системою температурних датчиків, що здійснює контроль температури у внутрішньому просторі вогневої печі та поверхні і внутрішніх шарів досліджуваних елементів конструкцій. Контрольна система доповнюється програмним забезпеченням автоматичної фіксації, обробки вимірювань та керування форсунками для дотримання відповідного температурного режиму у камері вогневої печі.



Рис. 1.4. Схема улаштування установки для проведення вогневих випробувань горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій

На рис. 1.5 представлено зовнішній вигляд різних випробувальних установок, що діють у нашій країні та за кордоном.

Контрольно-вимірювальна система має три аспекти своєму y функціональному призначенні: контроль температури в просторі вогневої печі, керування паливно-форсунковою системою та контроль деформацій досліджуваних елементів залізобетонних конструкцій. Як правило, основним показником напружено-деформованого стану елемента залізобетонної конструкції є значення його найбільшого переміщення у поздовжньому або

поперечному напрямках. Вимірювання переміщення досліджуваних залізобетонних конструкцій відбувається у місці найбільшого прогину для горизонтальних конструкцій усередині прольоту, або найбільшого поздовжнього переміщення верхнього кінця стиснутого елемента, до якого прикладене навантаження.

Важливою вимогою для забезпечення відповідної якості результатів експериментів до схеми встановлення термопар є необхідність гарантування, що пальникові факели не мають їх торкатися.





Рис. 1.5. Зовнішній вигляд установок для вогневих випробувань залізобетонних конструкцій на вогнестійкість

При вимірюванні температури у внутрішніх шарах елементів залізобетонних конструкцій термопари встановлюють у визначених місцях згідно із схемою вимірювання під час виготовлення зразка. Термопари встановлюють у спеціальних трубках або отворах, передбачених у визначених місцях зразка.

Досліджувані зразки залізобетонних конструкцій перед випробуваннями мають пройти стадію підготовки, що полягає у їхньому висушуванні. Потім зразки мають бути встановлені в установку та відповідним чином навантажені. У такому разі досліджувані зразки повинні бути навантажені не менш ніж за 15 хв до початку експерименту відповідно до рівня, встановленого умовами випробування, із покроковим прикладанням навантаження та періодом витримки у навантаженому стані не менше ніж за 1 добу. Навантаження досліджуваних зразків залізобетонних конструкцій реалізується за методикою [23–25].

Підготовчий етап установки до випробувань має бути проведений із дотриманням вимог відповідних інструкцій з експлуатації. Деформації, що виникли після прикладання навантаження та періоду стабілізації досліджуваного елемента, мають бути зафіксовані та відповідним чином зареєстровані.

Вимоги чинних стандартів України [23–25] дозволяють одночасне випробування двох зразків елементів залізобетонних конструкцій.

Під час проведення вогневих випробувань із дотриманням необхідних умов їхнього проведення за стандартними методиками мають бути вивчені статистичні дані та критерії, які визначають вірогідність та достовірність результатів вимірювання. Такі додаткові дослідження проводяться з метою зменшити вплив похибок, які імовірно можуть виникнути в процесі вогневих випробувань. Джерелами появи таких похибок можуть бути недосконалість вимірювальних засобів, вплив погодних або випадкових обставин на умови проведення експерименту, помилки під час фіксування та обробки експериментальних даних. Окремою обставиною, що може бути джерелом істотної похибки, є невідповідність умов навантаження та закріплення досліджуваних зразків залізобетонних конструкцій реальним умовам роботи конструкції у відповідній структурі.

Наведені вище особливості впливають на точність та достовірність результатів випробувань і можуть привести до появи похибки близько 30 % [36].

Серед недоліків експериментальних методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій на основі вогневих випробувань слід також віднести велику вартість, трудомісткість та негативний екологічний вплив.

Окремого обговорення заслуговує питання фіксації настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності у процесі випробувань. Для фіксації ознак настання такого граничного стану, перерахованих у п. 1.2, постійного необігрівної необхідне проведення контролю поверхні огороджувальної досліджуваної конструкції випробувань. протягом Практичний досвід проведення вогневих випробувань показує, що такий контроль є утрудненим. Наприклад, точкове розташування ватних тампонів поблизу необігрівної поверхні не дозволяє однозначно встановити можливість настання або ненастання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності з причини локальності появи наскрізних отворів, положення яких може не збігатися із положенням контрольного ватного тампона.

Детальний огляд необігрівної поверхні з метою фіксації глибоких або наскрізних тріщин можливий тільки у випадку випробування вертикальних огороджувальних елементів. Стосовно плит перекриттів такий огляд можливий тільки після проведення випробувань, оскільки необігрівна поверхня у цих умовах закрита гравітаційним навантаженням.

Спостереження за допомогою проведення відеофіксації також не дозволяє отримати точного розташування глибоких та наскрізних дефектів. З цієї точки зору як недолік можна вказати на утруднене фіксування настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

Під час фіксації ознак настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності після проведення випробувань, коли зразок розвантажують і знімають з випробувальної установки, також може виникнути певна невизначеність, оскільки певні деформації зникають і тріщини можуть змикатись. Тому можуть бути зафіксовані тільки явні ознаки дефектів, які можна ідентифікувати саме як ознаки втрати цілісності.

Тож можна зробити висновок, що при дослідженні настання граничного

стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності у залізобетонних конструкціях на цьому етапі розвитку експериментального підходу для оцінювання вогнестійкості виникають суттєві питання щодо чіткості фіксування ознак настання такого граничного стану протягом та після випробувань.

# 1.5. Розрахункові методи оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій

Розрахункові методи оцінювання вогнестійкості є розумною альтернативою до експериментальних методів, що до недавнього часу вважалися найбільш точними та прийнятними. Такий стан зберігався до того моменту, коли почали активно розвиватися обчислювальна техніка та програмні засоби, що дозволяють суттєво підвищувати продуктивність обчислювальних операцій. За таких умов стало можливим враховувати всі феноменологічні властивості матеріалів та особливості їхньої поведінки в нормальних умовах та під час впливу високих температур. Інтенсивний розвиток та практичне застосування розрахункових методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій завдячує систематизації великого практичного експериментального досвіду, спостережень за пожежами та особливостями їхньої руйнівної дії щодо таких конструкцій. Такий практичний досвід дозволяє сформулювати низку припущень та гіпотез для реалізації інженерних підходів щодо розв'язання задач оцінювання вогнестійкості, на яких базуються відносно прості розрахункові експрес-методики, що мають високу продуктивність. Також набір сучасних знань про поведінку залізобетону під час нагрівання в умовах пожежі дозволяє врахувати її феноменологічні особливості у разі застосування загального теоретичного підходу. Загальний теоретичний підхід заснований на застосуванні диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану твердого тіла, теплопровідності, термогазодинаміки при їхньому інтегруванні за допомогою чисельних методів. Прикладом таких методів є метод скінченних різниць та скінченних елементів. Викладене вище дозволяє розділити існуючі розрахункові методи оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій на дві умовні групи – спрощені

та уточнені методи.

Спрощені розрахункові методи оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій у своїй основі використовують або існуючий широкий практичний експериментальний і розрахунковий досвід, узагальнений у вигляді довідникових таблиць і номограм, або інженерні розрахункові методики за простими математичними моделями, створеними на основі комплексу припущень та гіпотез опору матеріалів, що спрощують їхнє формулювання. За таких умов отримані результати дозволяють сформувати продуктивний розрахунковий підхід, проте встановлені межі вогнестійкості конструкцій є суттєво завищеними, що спричиняє закладання у залізобетонні будівельні конструкції великих запасів вогнестійкості. Нормами [1-18], що містять рекомендації щодо застосування вогнестійких методів при проєктуванні залізобетонних розрахункових конструкцій, вказуються такі методи, як основні базові, оскільки вони є дуже продуктивними, економічними і інженерно осяжними для широкого класу фахівців. У цьому контексті великі запаси вогнестійкості сприймаються радше як їхня перевага.

Структурна схема, на якій показані основні особливості існуючих спрощених методів, наведена на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Структурна схема спрощених розрахункових методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій

Уточнені методи у своїй основі мають загальний теоретичний підхід, який передбачає використання диференціальних рівнянь для описання стану речовини В ієрархії розрахункових методів оцінювання вогнестійкості V точці. залізобетонних будівельних конструкцій уточнені метоли вважають найскладнішими у реалізації, але такими, що мають найбільшу точність. Серед робіт, які описують основні підходи та рекомендації щодо реалізації методів цього методу, можна виділити такі основні [18, 26, 36, 46-100]. Згідно із цими рекомендаціями задача розрахунку параметрів залізобетонних будівельних конструкцій під час теплового впливу пожежі розділяють на дві окремі основні задачі – теплотехнічну задачу та статичну задачу, які можна вирішувати комплексно або окремо.

Формально задача відтворення поведінки залізобетонних будівельних конструкцій під час нагрівання в умовах пожежі з метою комплексного аналізу настання трьох граничних станів втрати вогнестійкості відноситься до задач термопружності і термопластичності, оскільки тепловий вплив зумовлює зміну напружено-деформованого стану у залізобетоні, і навпаки зміна напруженодеформованого стану (НДС) може вплинути на умови нагрівання таких конструкцій. Крім цього, у роботах [56–100] зазначено, що суттєвого впливу на теплові та механічні процеси зазнають від газогідродинамічних процесів під час нагрівання, випаровування та конденсації вологи, яка міститься у пористій внутрішній структурі бетону.

Зважаючи на це, система рівнянь, що описує тепловий і напруженодеформований стани всередині залізобетону, а також газогідродинамічні процеси, які відбуваються з внутрішньою вологою в бетоні, повинна містити рівняння, що комплексно описують термонапружений стан у точці, доповнені рівняннями стану води та водяної пари у порах бетону. Важливим моментом також є необхідність урахування хімічних і фазових перетворень у бетоні та арматурній сталі, що є причиною зміни теплофізичних та механічних властивостей цих матеріалів, а також має чітко виражені теплові ефекти із додатковим виділенням або поглинанням теплової енергії [36, 80–100]. Крім цього, особливості термомеханічних та теплофізичних процесів, що відбуваються всередині бетону, мають бути враховані при описанні теплообміну між середовищами – газовим у приміщенні із пожежею та твердим тілом, тобто безпосередньо залізобетонними будівельними конструкціями.

За таких умов математична модель, що комплексно описує всі фізикохімічні процеси, є надзвичайно складною і у такому комплексному вигляді з огляду на свою складність майже не застосовується [105–10910], оскільки така комплексність може поставити під сумнів осяжність рішення подібних задач.

Без суттєвого погіршення точності можуть бути створені менш складні математичні моделі, які дозволяють достатньо повно описувати всі перелічені процеси для ефективного прогнозування поведінки залізобетонних будівельних конструкцій під час нагрівання в умовах пожежі.

Аналізуючи роботи [107–115], можна прийти до висновку, що для розв'язання задачі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій застосовують усталений дещо спрощений підхід, заснований на припущенні незалежності теплових і механічних процесів всередині залізобетону, а також припущенні відсутності достатньої кількості внутрішньої вологи в бетоні для появи його крихкого руйнування під дією нагрітої водяної пари.

Вказані припущення дозволяють розділити задачу вогнестійкості на дві окремі основні задачі – теплову задачу та задачу аналізу напруженодеформованого стану у залізобетонних будівельних конструкціях, яку у роботах [26–46] називають ще структурною задачею.

Зважаючи на відокремлення теплотехнічної та статичної задачі, розрахункове оцінювання вогнестійкості за уточненими методами відбувається з використанням усталеного традиційного підходу у два етапи.

На першому етапі вирішують задачу теплопровідності із застосуванням спрощеної схеми теплообміну між газовим пожежним середовищем та твердою фазою матеріалу залізобетонних конструкцій на основі формулювання крайової задачі теплопровідності із граничними умовами (ГУ) III роду [36–107]. Результатом розрахунку на першому етапі при розв'язанні теплотехнічної задачі є

отримання температурних розподілень у визначені моменти часу теплового впливу пожежі. Ці результати уже на першому етапі дозволяють проаналізувати настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності залізобетонних будівельних конструкцій. Як правило розв'язок цієї задачі є нескладним і не потребує суттєвих затрат часу.

Наступним етапом є аналіз статичної задачі, що дозволяє прослідкувати настання граничного стану втрати вогнестійкості за несучою здатністю. При постановці задачі міцності залізобетонних конструкцій під час теплового впливу пожежі має бути враховані суттєво нелінійна поведінка залізобетону, поява великих деформацій, утворення тріщин та дефектів у бетоні, температурні деформації бетону і арматурної сталі та помітне погіршення їхніх механічних характеристик. Для формування граничних умов, що прикладаються до елементів залізобетонних конструкцій під тепловим впливом пожежі, у якості навантаження діючі прикладаються навантаження згідно i3 розрахунковими схемами конструкцій та температурні дані, отримані у ході розв'язання теплотехнічної задачі на першому етапі. Набір даних, що отримується у результаті розрахунків на цьому етапі, дозволяє зафіксувати настання граничного стану втрати несучої здатності через прямі макропараметри, які використовуються для фіксації такого граничного стану під час проведення вогневих випробувань, як це показано у роботах [91-100, 115].

Проте, не зважаючи на суттєве полегшення розрахунків у разі застосування описаного підходу, поставлені задачі є складними. Складність записаних диференціальних рівнянь для їхнього розв'язання не дозволяє отримати прості аналітичні рішення для їхнього коректного інтегрування. Тому доцільно для таких розрахунків застосовувати наближені числові методи. Найбільш поширеним варіантом є застосування методу скінченних різниць або методу скінченних елементів. Такий досвід добре описаний у роботах [36, 81–100].

Реалізація обчислювальних алгоритмів інтегрування диференціальних рівнянь математичних моделей для описання поведінки залізобетонних будівельних конструкцій під час теплового впливу пожежі є окремою складною задачею, що потребує відповідної кваліфікації дослідників, часу і, відповідно, суттєвих матеріальних та трудових затрат на її вирішення. Тому є широкий досвід реалізації числових алгоритмів інтегрування рівнянь математичних моделей із використанням як основного інструменту одного з комерційних універсальних комп'ютерних комплексів, програмний код яких реалізує широкий спектр обчислювальних алгоритмів, у тому числі для спеціалізованих математичних моделей, розроблених для безпосередньо залізобетону під час його роботи за умови підвищених або високих температурах його нагрівання. До таких комп'ютерних комплексів, безумовно, можна віднести універсальні системи ANSYS Workbench та ABAQUS.

Комп'ютерний комплекс ANSYS Workbench є універсальною системою, що дозволяє вирішувати задачі багатьох галузей фізики, з яких найбільший інтерес мають модулі системи, що дозволяють комплексне рішення теплотехнічних та статичних задач. Найбільш ефективним модулем для рішення наукоємної задачі, якою є задача вогнестійкості залізобетонних конструкцій, залишається спеціалізований модуль ANSYS APDL. Цей модуль ще відомий як ANSYS Mechanical у більш ранніх версіях даного програмного комплексу. Його опис і властивості досить широко, описані у роботах [36, 81–114]. У них добре висвітлена ефективність такого підходу.

Основна математична модель, реалізована у цьому комплексі, заснована на використанні методу скінченних елементів у нелінійній постановці ДЛЯ розв'язання теплотехнічної i3 та статичної задач використанням температурозалежних теплофізичних і механічних властивостей бетону та арматурної сталі. Напружено-деформований стан розраховується за допомогою статичних рівнянь, складених на основі дискретизації системи за допомогою скінченних елементів на базі методу переміщень. У цій системі також реалізований підхід із реалізацією алгоритму розрахунку параметрів напруженодеформованого стану із врахуванням утворення тріщин та дефектів у бетоні на основі використання теорії міцності залізобетону і розрахунку на її основі пластичних деформацій у ньому.

Не менш ефективним комплексом для розв'язання такого типу задач є комп'ютерний комплекс ABAQUS як системний модуль робочого місця для проведення математичного моделювання фізичних систем. Цей модуль розвиває такий самий підхід, що реалізований у комплексі ANSYS APDL. Досвід використання зазначеного комп'ютерного комплексу для розв'язання задач вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій описаний у роботах [116–124].

Окремої уваги заслуговує підхід, описаний у роботах [101–122]. Цей підхід застосовує явний метод розрахунку (explicit method), який використовують для описання руху механічних систем під час термосилового впливу прикладених зусиль та високих температур під час пожежі рівняння динаміки. В цьому випадку суттєво знижуються складності, пов'язані із обумовленістю систем алгебраїчних рівнянь, які записуються у результаті дискретизації розрахункової області за допомогою скінченних елементів. В роботах [123-132] описаний підхід, що представляє елементи залізобетонних конструкцій за допомогою пластин і балок із властивостями, які рекомендовані нормативними документами [11-18]. Важливою особливістю такого підходу є можливість описати реалістичну картину розподілення тріщин у бетоні елементів залізобетонних будівельних конструкцій. Для застосування такого підходу використовуються розрахункові модулі програмних комплексів ANSYS Workbench та ABAQUS, в кодах яких реалізований неявний метод.

Підсумовуючи викладене, слід зазначити, що уточнені розрахункові методи є ефективним засобом оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій при фіксації часу настання граничних станів втрати теплоізолювальної та несучої здатностей. Це підтверджується численними даними, викладеними у роботах [124–137], де проведена верифікація отриманих розрахункових даних шляхом їхнього порівняння із експериментальними даними, одержаними в процесі вогневих випробувань. Тому рекомендації, подані у нормативних документах [11– 18], визначають дані методи як надійні і такі, що можуть бути використані для оцінювання вогнестійкості, як засіб, що дозволяє обгрунтувати необхідні вимоги, якщо нижчі за ієрархією методи не дали очікуваних результатів. Серед переваг таких методів можна виділити їхню широку інформативність, наочність, можливість використовувати прямі макропараметри, такі, ЯК величини температури на необігрівній стороні елемента конструкції, максимального прогину та швидкість його наростання залежно від часу, можливість аналізу конструкцій будь-якого типу та будь-якого типу навантажень і закріплень цих конструкцій, гнучкість при розгляді різного типу теплового впливу пожежі, включаючи реальні типи із врахуванням періоду згасання пожежі. Як недоліки слід зазначити складність математичних моделей, високі вимоги щодо засобів реалізації розрахунку та залучення кваліфікованих фахівців, які його здійснюють, великі трудові та часові затрати на підготовку математичних моделей і реалізацію розрахунку, велику вартість програмного та апаратного забезпечення тощо.

Незважаючи на вказані недоліки, переваги розрахункових методів характеризують їх як надзвичайно ефективний засіб для оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. Причому в багатьох випадках розрахунковий підхід є єдиним можливим для аналізу вогнестійкості великогабаритних, унікальних або особливих конструкцій.

Варто зазначити, що нині існуючі нормативні документи [11– 18] розвинених країн не містять рекомендацій щодо застосування розрахункових методів для оцінювання цілісності. Тобто наразі не існує методів розрахункового оцінювання цілісності залізобетонних конструкцій, що мали б апробовану практичну реалізацію, розвинену критеріальну базу, отримані оприлюднені результати із відповідною верифікацією. В роботах [109–113] рекомендують розглядати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності з точки зору можливості появи крихкого руйнування бетону.

Розгляду проблемі розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності присвячено певна низка досліджень, результати яких наведено у роботах [110, 111, 138]. В цих роботах зазначено, що втрата цілісності пов'язана із настанням крихкого руйнування бетону. Критеріальна база настання такого явища пов'язана з вологістю бетону, і за умови, що бетон відповідним чином кондиціонований, критичні умови для настання крихкого руйнування майже гарантовано не виникають. Інші умови утворення наскрізних дефектів у залізобетонних конструкціях майже не розглянуто.

Багато робіт [134–138] пояснює відсутність серйозного аналізу задач втрати цілісності залізобетонними конструкціями під тепловим впливом пожежі дуже популярною гіпотезою, що наскрізні тріщини утворюються тільки після втрати такими конструкціями несучої здатності, або перед цим у час дуже близький до такого моменту. І за таких умов автори цих робіт вважають за недоцільне приділяти цьому багато уваги і прийняти як базове твердження, що умова настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності критеріально збігається із настанням граничного стану втрати несучої здатності.

#### 1.6. Зміна властивостей бетону в умовах впливу пожежі

Для розробки ефективних інженерно осяжних методів прогнозування поведінки залізобетонних будівельних конструкцій важливим є детальне розуміння процесів, які відбуваються в елементах залізобетонних конструкцій умовах теплового впливу пожежі. Основним матеріалом, що складає основу залізобетону є бетон. Структура, фазовий й хімічний склад, властивості бетону достатньо вивчені, що відображено у низці робіт [29, 36, 139–167]. Залізобетон – це складний особливий матеріал, який займає окреме місце серед конструкційних будівельних матеріалів і його характерні властивості повністю визначають його поведінку під час нагрівання в умовах пожежі. Важливою особливістю залізобетону й бетону є те, що формально його можна віднести до композиційних матеріалів. Проте потрібно зазначити, що композиції у залізобетоні можна виділити і на макрорівні – це сталева арматура, крупний заповнювач та цементний камінь. Сам цементний камінь є композиційним матеріалом на мікрорівні. На мікрорівні композицію у бетоні складають такі компоненти: негідратовані цементні ядра, гідратовані цементні оболонки ядер, пори з вологою на їхній поверхні. На рис. 1.7 наведені фазово-структурні схеми

#### композиції бетону.



Рис. 1.7. Фазово-структурні схеми бетону: *а* – на макрорівні; *б* – на мікрорівні: *1* – повітряні пори; 2 – крупний заповнювач; 3 – цементний камінь; 4, 5 – усадочні тріщини; 6 – негідратовані цементні ядра; 7 – гідратовані оболонки цементних ядер; 8 – внутрішня волога; 9 – структурна пора

Окремо кожен компонент є складним матеріалом, що має власний фазовий склад і хімічну структуру. У табл. 1.2 наведено фазово-хімічний склад окремих компонентів залізобетону.

Фазово-хімічний склад компонентів залізобетону безумовно зазнає зовнішніх впливів [29, 38, 139–151] і змінюється під дією циклів нагріванняохолодження, механічних навантажень, зволоження-сушки, а також впливу хімічно активних речовин тощо.

Вплив високих температур у поєднанні з механічними навантаженнями під час пожежі призводить до значної зміни фазово-хімічного складу всіх компонентів залізобетону без винятку, а також до фізичних ефектів, що визначають поведінку елементів залізобетонних будівельних конструкцій і настання граничних станів втрати вогнестійкості. Прикладом комбінованого впливу нагрівання та дії механічного навантаження є деструкція фазової структури бетону, як це видно на мікрофотографіях (рис. 1.7) такої структури, отриманих за допомогою електронної растрової мікроскопії, отриманих у роботах [38, 139]. Хімічний склад основних компонентів, структурних утворень і фаз залізобетону

№ п/п	Компонент, фаза компонента Крупний заповнювач	Основна речовина Щебінь (граніт)	Розміри компонентів та фаз 5–70 мм	Хімічна формула SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O(Na <sub>2</sub> O, CaO)·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6(2)SiO <sub>2</sub>
2	Дрібний заповнювач	Пісок	1–3 мм	SiO <sub>2</sub>
3	Пори	Повітря із вологою	0,001–2 мм	
4	Негідратоване ядро в'яжучого	Портланд- цементний клінкер	0,1–10 мкм	аліт – $3CaO \cdot SiO_2(C_3S)$ , беліт – $2CaO \cdot SiO_2(C_2S)$ , целіт – $3CaO \cdot SiO_2(C_3A)$ , целіт – $4CaO \cdot SiO_2(C_4AF)$ .
5	Сталева арматура	Сталь	Ø 5–50 мм	Fe+C у різних фазах залежно від вмісту та температури
6	Гідратована частина в'яжучого після затвердіння (новоутворення)	Гідратова- ний портланд- цементний клінкер	0,1–10 мкм	$\begin{array}{c} 3{\rm CaO}\cdot 2{\rm SiO}_{2}\cdot 6{\rm H}_{2}{\rm O},\\ {\rm Ca(OH)}_{2},\\ 3{\rm CaO}\cdot {\rm Al}_{2}{\rm O}_{3}\cdot 6{\rm H}_{2}{\rm O},\\ 3{\rm CaO}\cdot {\rm Al}_{2}{\rm O}_{3}\cdot 3{\rm CaSO}_{4}\\ (31\ldots 32){\rm H}_{2}{\rm O},\\ 3{\rm CaO}\cdot {\rm Fe}_{2}{\rm O}_{3}\cdot n{\rm H}_{2}{\rm O}. \end{array}$

88

Мікрофотографії, подані на рис. 1.7 показують, що цементний камінь у бетоні окислюється і це, очевидно, негативно позначається на теплофізичних та механічних властивостях бетону.

Загалом фізико-хімічні процеси, що відбуваються у бетоні можна розділити на декілька етапів. Перший етап є початковим і пов'язаний із нагріванням бетону від 20 °C до 90 °C на цьому етапі відбувається додаткова гідратація цементного каменя, оскільки підвищення температури до вказаних значень сприяє цьому, як це показано у роботах [29, 38, 139–186].



Рис. 1.7. Мікрофотографії фазової структури бетону: *а* – до нагрівання; б – після нагрівання до 600°С

За таких умов механічні властивості за деякими даними [133] можуть покращуватися, оскільки додаткова гідратація є сприятливим фактором для цього, проте за даними робіт [29, 38, 142–152] можно зауважити, що утворення додаткових мікротріщин не дає змоги спостерігати суттєвого поліпшення механічних властивостей бетону.

На другому етапі бетон нагрівається до температур від 90 °С до 120 °С. Для цього етапу характерна активна фаза випаровування та фільтрації вологи, яка перебуває у порах бетону. За результатами досліджень, наведених у роботах [29, 38, 152–161], рух вологи крізь пори бетону, випаровування та її фільтрація є

причиною помітних термодинамічних ефектів, що полягають у додаткових затратах теплової енергії на нагрівання бетону, оскільки випаровування води має значний ендотермічний ефект. В такому випадку певний час температура не підвищується до повного випаровування та видалення значної частини вологи із пор бетону. Ще одним характерним ефектом в такому разі є підвищення тиску водяної пари у порах бетону внаслідок фільтрації вологи. За значного насичення бетону вологою та відсутності нормального кондиціювання й висушування залізобетонних конструкцій існує небезпека, що тиск водяної пари у порах бетону може досягти критичних значень і спричинити його руйнування. Таке явище називається крихким руйнуванням бетону і воно добре описано у роботах [29, 38, 109–113]. Описане характерне явище сильно впливає на теплофізичні характеристики, що помітно змінюються за таких умов. Однак щодо структури пористого каркаса цементного каменю слід зазначити, що його механічні характеристики помітно не погіршуються, оскільки процес подальшої гідратації не припиняється, як показано в роботах [29, 38, 187, 188].

Наступний, третій етап, пов'язаний із подальшим нагріванням бетону у діапазоні величин температури від 120 °C до 450 °C. На цьому етапі відбувається повне видалення вологи з пор каркасу цементного каменю і поступово видалення води із гідрокристалітних структур, тобто ініціюється процес дегідратації. Ці фізико-хімічні процеси мають слабко виражений ендотермічний ефект, що несуттєво впливає на зміну теплофізичних характеристик, що відображено у роботах [161–178]. На відміну від слабкого термодинамічного ефекту процес дегідратації суттєво впливає на механічні характеристики бетону. У кінці цього етапу спостерігається погіршення механічних характеристик майже удвічі, як свідчать результати досліджень, наведені у роботах [178–186].

Важливим є четвертий етап, пов'язаний із нагріванням бетону у діапазоні температур від 420 °C до 610 °C. Найбільш визначальним фізико-хімічним процесом у бетоні при його нагріванні до температури таких величин є повна швидка дегідратація гідрокристалітних структур цементного каменя та подальше окислення речовин структури. Такий процес має два основні наслідки, пов'язані з

фізико-хімічними змінами структури. По-перше, він проявляється в ендотермічному ефекті, що спричиняє незначне, але помітне зменшення теплопровідності. По-друге, відбувається різке зниження механічних властивостей бетону. Таки ефекти досить широко описані у роботах [29, 38, 139–186].

Суттєвих ушкоджень на п'ятому етапі зазнає структура бетону, при його нагріванні до температур у діапазоні від 610 °C до 800 °C. Процеси дегідратації та окислення у цементному камені досягають найбільшого розвитку і приводять до того, що теплопровідність стабілізується, а погіршення механічних властивостей прискорюються, і у кінці етапу бетон практично втрачає здатність до опору деформаціям. Такі процеси описані у роботах [29, 38, 161–175].

На останньому, шостому етапі, як свідчать дані досліджень [29, 38, 184– 186], коли температура бетону досягає значень від 800 °C до 1200 °C, його внутрішня структура повністю деградує. На цьому етапі теплофізичні властивості є стабільними, тоді як механічні властивості зумовлюють абсолютне вичерпання здатності бетону до опору.

В залежності від математичних моделей, які застосовуються для описання поширення тепла у твердій фазі, існують параметри, що описують теплофізичні властивості бетону. Історично для розв'язання задач теплопровідності поширення тепла в бетоні під впливом пожежі застосовується нестаціонарне рівняння теплопровідності [10–17, 189–201]:

$$c_{p}(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(\lambda(\theta)\nabla\theta), \qquad (1.13)$$

де:  $\rho(\theta)$ ,  $\lambda(\theta)$ ,  $c_P(\theta)$  – залежні від температури нагріву густина бетону, коефіцієнт теплопровідності бетону та питома теплоємність бетону відповідно.

Це рівняння теплопровідності у деяких роботах називають квазілінійним, оскільки його теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності та

об'ємна питома теплоємність – є залежними тільки від температури нагрівання бетону.

Дослідженням теплофізичних властивостей бетону під час високотемпературного нагрівання присвячено багато робіт [28, 36, 106, 107, 168– 208]. Основним інструментом для отримання даних про закономірності зміни теплофізичних бетону характеристик € застосування обернених задач теплопровідності, методики постановки та розв'язання яких добре описані у роботах [202-208]. На рис. 1.8 наведені дані щодо температурних залежностей коефіцієнту теплопровідності, отриманих для різних типів бетону відповідно до роботи [29, 151–186].



Рис. 1.8. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності для різних типів бетону: 1 – універсальна залежність для всіх типів бетону за ACI 2007; 2 – легкий бетон; 3 – бетон на карбонатному заповнювачі; 4 – бетон на карбонатному заповнювачі висушений; 5 – звичайний бетон на гранітному заповнювачі

На графіках, наведених на рис. 1.8 можна прослідкувати зміну характеру температурних залежностей коефіцієнта теплопровідності різних типів бетону у залежності від фізико-хімічних процесів, що відбуваються у внутрішніх шарах на різних стадіях нагрівання. Можна помітити, що ефекти на різних стадіях нагрівання, описані вище, для різних бетонів мають неоднаковий характер вираження, тому криві досить суттєво відрізняються між собою.

Існують також інші дослідження теплофізичних характеристик бетону під час високотемпературного нагріву в умовах пожежі, що впровадженні у різні нормативні документи. На рис. 1.9 наведені інші температурні залежності коефіцієнта теплопровідності, отримані іншими дослідниками та наведені у різних нормативних документах.



Рис. 1.9. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності: 1 – Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2005 [15]; 2 – СТО 36554501-006-2006 [36]; 3 –Т.Т. Lie [157–164]; 4 – згідно з даними роботи [36]; 5 – усереднені дані

Так само на графіках, наведених на рис. 1.10 можна прослідкувати зміну характеру температурних залежностей питомої об'ємної теплоємності різних типів бетону залежно від фізико-хімічних процесів, які відбуваються у внутрішніх шарах на різних стадіях нагрівання згідно із даними, наведеними у роботі [29]. Також відмічається, що ефекти на різних стадіях нагрівання, описані вище, для різних бетонів мають неоднаковий характер і мають різний ступінь вираження.

В цілому можна відмітити, що характер зміни теплофізичних характеристик залежно від температури мають дуже умовний характер, а такі характеристики називають ефективними, оскільки вони характеризують багатофазний та багатокомпонентний матеріал із складними фізико-хімічними процесами. Цим можна пояснити велику різницю наведених даних температурних залежностей теплофізичних характеристик, отриманих різними дослідниками.



Рис. 1.10. Температурні залежності питомої об'ємної теплоємності: 1 – важкий бетон на гранітному заповнювачі; 2 – важкий бетон на карбонатному заповнювачі; 3 – керамзітобетон; 4 – легкий бетон

Також у цьому випадку досвід багатьох досліджень був впроваджений у нормативні документи, приклади таких залежностей наведені на рис. 1.11.



Рис. 1.11. Температурні залежності питомої об'ємної теплоємності: *I* – Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2005 [15]; *2* – СТО 36554501-006-2006 [36]; *3* – Т.Т. Lie [157–164]; *4* – згідно з даними роботи [36]; *5* – усереднені дані

Одним з найбільш впливових факторів щодо вогнестійкості залізобетонних конструкцій є зміна механічних характеристик бетону. На рис. 1.12 наведені графіки, які зображують залежність відносної міцності різних типів бетону на стискання від температури, що наведені у роботах [29, 140–142].



Рис. 1.12. Температурні залежності відносної міцності, отримані різними дослідниками: *1* – звичайний бетон на гранітному заповнювачі згідно із роботами Castillo [29]; *2* – звичайний бетон на гранітному заповнювачі згідно із роботами Diederich [29]; *3* – бетон на карбонатному заповнювачі згідно із роботами Abrams [29]; *4* – бетон на силікатному (кварцовому) заповнювачі згідно із роботами Abrams [29]; *5* – легкий бетон згідно із роботами Abrams [140–142]; *6* – звичайний бетон на гранітному заповнювачі [29]; *5* – легкий бетон згідно із роботами Аbrams [29]; *5* – легкий бетон згідно із роботами Аbrams [140–142]; *6* – звичайний бетон на гранітному заповнювачі згідно із роботами Аbrams [29]; *5* – легкий бетон згідно із роботами Аbrams [140–142]; *6* – звичайний бетон на гранітному заповнювачі згідно із роботами Аbrams [29]; *5* – легкий бетон згідно із роботами Аbrams [140–142]; *6* – звичайний бетон на гранітному заповнювачі згідно із роботами Аbrams [29]; *5* – легкий бетон згідно із роботами Аbrams [140–142]; *6* – звичайний бетон на гранітному заповнювачі згідно із роботами Аbrams [29]; *5* – легкий бетон згідно із роботами Аbrams [140–142]; *6* – звичайний бетон на гранітному заповнювачі згідно із роботами Аbrams [29]

Графіки на рис. 1.12 показують, що тенденції щодо описаних вище ефектів зберігаються у різних вираженнях переважно для важкого бетону та дещо менше для легкого бетону і бетону на карбонатному заповнювачі.

Отриманий широкий досвід вивчення механічних властивостей бетону був втілений у вигляді певних узагальнених кривих, які рекомендуються різними нормативними документами. Як приклад такого узагальнення можна навести криві, рекомендовані нормами [15], наведені на рис. 1.13.

Характерною особливістю деформування бетону є її суттєво нелінійний характер навіть навіть у разі малих значень деформацій. Це зобов'язує під час оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій враховувати цей характер, особливо це стосується розрахункових методів.



Рис. 1.13. Температурні залежності відносної міцності, рекомендовані нормами [15]: 1 – звичайний бетон на гранітному заповнювачі; 2 – звичайний бетон на карбонатному заповнювачі

Нелінійну поведінку бетону описують за допомогою діаграм деформування, що виражають залежність напружень у бетоні від наданих деформацій. При цьому, як правило, опір бетону при його розтягу не враховується і діаграми деформування мають тільки ту частину, яка описує стискання бетону. В роботах [83–91] вказуно на важливість врахування нелінійної поведінки бетону при застосуванні розрахункових методів не тільки на висхідній гілці діаграми деформування, а й на низхідній гілці.

Враховуючи, що міцність на стискання відчутно зменшується під впливом високотемпературного нагрівання, поведінку бетону, нагрітого до певної температури, описують за допомогою сукупності діаграм деформування, побудованих для відповідних значень температури. Існує багато даних щодо таких діаграм деформування, наведених у роботах [29, 36, 142–186]. Приклад таких діаграм, отриманих для бетону із заданим класом міцності показаний на рис. 1.14.



Рис. 1.14. Діаграми деформування бетону при різних величинах температур його нагрівання

Крім закономірностей деформування бетону важливе значення мають його температурні деформації. На рис. 1.15 наведені закономірності зміни температурних деформацій залежно від температури, що відомі з робіт [15, 36, 161–176].



Рис. 1.15. Моделі температурних деформацій важкого бетону на гранітному заповнювачі: 1 – EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [15]; 2 – CTO 36554501-006-2006 [36]

#### 1.7. Зміна властивостей арматурної сталі в умовах впливу пожежі

Для розробки ефективних інженерно осяжних методів прогнозування поведінки залізобетонних будівельних конструкцій також не менш важливим є розуміння процесів, що відбувається ще в одному з основних компонентів залізобетону – арматурній сталі.

Процесам, що відбуваються у сталі під час високотемпературного нагрівання, присвячено роботи багатьох дослідників [29, 36, 154–161, 209–225]. Внутрішня мікроструктура сталі добре відома. Загалом сталь складається з мікрокристалів заліза та містить карбон у різних фазах у кількості, що не перевищує 2,14%. При цьому фазовий та структурний склад сталі сильно залежить від температури нагрівання та від вмісту карбону у сталі. Фазовий склад в такому разі визначаюь добре відомою діаграмою «залізо-карбон», що визначає, по-перше, тип кристалічної решітки у мікрокристалах заліза, а, по-друге, визначає тип поєднання заліза із вуглецем: від механічної суміші та дифузного взаємного проникнення до хімічного сполучення. Також температура впливає на розміри мікрокристалічних зерен, оскільки із ростом температури розмір зерна збільшується.

Перетворення кристалічної решітки проілюстровано на рис. 1.16.



Рис. 1.16. Перетворення кристалічної решітки заліза у залежності від температури: *a* – α-залізо; *б* – β-залізо; *в* – γ-залізо; *г* – δ-залізо

Перетворення фазової структури арматурної сталі залежно від температури показано на рис. 1.17.



Зростання температури

Рис. 1.17. Перетворення фазової структура заліза залежно від температури

Таким чином, процес нагрівання арматурної сталі можна поділити на кілька етапів. Під час першого етапу температура підвищується від початкової (кімнатної) до 90–100 °C. На цьому етапі сталь практично не зазнає змін у фазовій, кристалічній або хімічній структурі. Відповідно, її теплофізичні та механічні характеристики залишаються майже незмінними, що підтверджується результатами досліджень, наведених у роботах [208–225].

Другий етап відбувається під час нагрівання арматурної сталі від 100 °С до величини температури 450 – 500 °С. Для цього етапу характерна перекристалізація арматурної сталі, що відбувається внаслідок зростання кристалічних зерен. Теплофізичні властивості не зазнають суттєвих змін, проте ріст зерен стає причиною поступового зменшення міцності сталі та її модуля пружності. І наприкінці нагрівання на цьому етапі міцність та модуль пружності арматурної сталі зменшуються майже вдвічі. Про це свідчать результати досліджень, наведені у роботах [214–225].

Третій етап пов'язаний із нагріванням арматурної сталі у діапазоні температур від 500 до 800 °С. На цьому етапі відбуваються хімічні процеси розкладання аустеніту та окислення заліза. Такі реакції є ендотермічними і потребують додаткових затрат теплової енергії, що суттєво впливає на теплофізичні характеристики арматурної сталі. Внутрішні фізико-хімічні процеси у сталі призводять до зменшення можливості більшості арматурних сталей опиратися деформуванню на 90 – 98 % у кінці цього діапазону. Такі процеси добре описані у роботах [15, 29, 36, 154–161, 209–225].

Четвертий етап є завершальним, коли нагрівання арматурної сталі сягає 800 – 1200 °C. На цьому етапі кристалічна решітка кристалітних зерен набуває конфігурації, що є найбільш слабкою, процеси фазових перетворень повністю лишає арматурні сталі можливості опиратися деформуванню.

На графіках, наведених на рис. 1.18, можна прослідкувати зміну характеру температурних залежностей коефіцієнта теплопровідності арматурних сталей залежно від внутрішніх фізико-хімічних процесів, що відбуваються на різних стадіях нагрівання за даними, наведеними в [15, 29, 36].



Рис. 1.18. Залежність коефіцієнта теплопровідності арматурної сталі від температури нагрівання

Видно, що графік залежності коефіцієнта теплопровідності від температури нагрівання арматурної сталі за умов теплового впливу пожежі корелює із фізикохімічними процесами, що були описані вище.

Так само можна прослідкувати вплив описаних фізико-хімічних процесів в арматурній сталі під час її нагрівання під тепловим впливом пожежі, проаналізувавши графік температурної залежності питомої теплоємності, рекомендований нормами [15, 29, 36], який поданий на рис. 1.19.

Так само видно, що графік залежності питомої теплоємності від температури нагрівання арматурної сталі за умов теплового впливу пожежі корелює із фізико-хімічними процесами, що були описані вище.



Рис. 1.19. Залежність питомої теплоємності арматурної сталі від температури нагрівання

Тепловий вплив пожежі на механічні характеристики арматурної сталі відіграє важливу роль у загальному впливі всіх характеристик на поведінку залізобетонних конструкцій під час пожежі. Дослідженню механічних характеристик арматурної сталі під час високотемпературного нагрівання в умовах пожежі присвячено роботи [15, 29, 36]. На рис. 1.20 наведені графіки зниження межі текучості арматурної сталі залежно від температури.



Рис. 1.20. Зміна межі текучості арматурних сталей у залежності від температури: 1 – гарячекатана за [29]; 2 – холоднотягнута за [29]; 3 – високоміцна за [29]; 4 – гарячекатана класу N за [15]; 5 – гарячекатана класу X за [15, 29]; 6 – холоднотягнута типу N за [15]; 7 – холоднотягнута типу X за [15]

Також, аналізуючи графіки зниження межі текучості різних арматурних сталей під впливом високотемпературного нагрівання, можна помітити кореляцію між фазовими та структурними перетвореннями у арматурній сталі та характером наведених кривих.

Прослідкувати характер зміни модуля пружності гарячекатаних арматурних стержнів під час нагрівання можна за кривими, що наведені на рис. 1.21, що є узагальненими і рекомендованими нормами [15, 29, 36, 154–161, 209–225].



Рис. 1.21. Зміна механічних характеристик арматурної сталі залежно від температури нагрівання: 1 – міцності на розтяг; 2 – міцності на стискання

Характер зміни механічних властивостей арматурної сталі відповідно до кривих, наведених на рис. 1.21, також підтверджує кореляцію, фазовими та структурними перетвореннями, що були описані вище.

Крім закономірностей деформування арматурної сталі важливе значення також мають її температурні деформації. На рис. 1.22 наведені закономірності зміни температурних деформацій залежно від температури для арматурної сталі, що відомі з робіт [15, 29, 36, 154–161, 209–225].

Характер кривих температурної деформації арматурної сталі показує, що різні джерела рекомендують схожі закономірності їхньої залежності від температури нагрівання. Крім цього, можна зазначити, що кореляція між наведеними закономірностями та описаними вище структурними та фазовими перетвореннями зберігається.



Рис. 1.22. Моделі температурних деформацій арматурної сталі у залежності від температури: 1 – для звичайних ненапружених арматурних сталей за [29, 36]; 2 – для попередньо напружених арматурних сталей за [15]; 3 – для всіх арматурних сталей за [36]

Таким чином, можна зробити висновок, що теплофізичні та механічні характеристики залежать від внутрішніх фізико-хімічних процесів у компонентах залізобетону – бетоні та арматурній сталі. Втрата вогнестійкості залізобетонних конструкцій відбувається з причини деградації компонентів залізобетону, розвитку деформацій, у тому числі температурних.

Багато джерел дають дуже схожі температурні залежності механічних характеристик компоненті залізобетону від температури.

Загалом можна зазначити, що найбільш розвинутими з точки зору узагальнення матеріалу щодо поведінки компонентів залізобетону під час високотемпературного нагрівання є норми [15].

### 1.8. Характерні функції основних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі

Аналіз змін властивостей окремих матеріалів, зокрема бетону та арматурної сталі, в умовах впливу пожежі (розглянуто у підрозділах 1.6 і 1.7), створює основу для розуміння загальних закономірностей поведінки залізобетонних конструкцій

у пожежних умовах. Встановлено, що втрата міцності матеріалів, виникнення температурних напружень та утворення тріщин спричиняють складні процеси, які визначають стан конструкцій у критичних ситуаціях в умовах впливу пожежі.

На цьому етапі важливо дослідити, як взаємодія матеріалів у складі залізобетонних конструкцій впливає на їхню несучу, теплоізолювальну здатність та цілісність в умовах впливу пожежі. Особливу увагу слід приділити характерним змінам у поведінці конструкцій, таким як розвиток тріщин, деформації та утворення дефектів, які значно впливають на їхню загальну вогнестійкість.

До основних типів залізобетонних конструкцій належать стіни, балки, колони та плити перекриття або покриття. Умови впливу пожежі по-різному впливають на конструкції залежно від їхньої геометрії, функцій та взаємодії з навантаженнями.

Залізобетонні колони виконують функцію несучих елементів конструкцій, їхня робота в умовах пожежі має критичне значення для забезпечення стійкості всієї будівлі. Пожежа впливає на колони через теплове навантаження, яке викликає зміни фізико-механічних властивостей як бетону, так і арматури, що призводить до змін їхньої несучої здатності.

У зв'язку з чим, а також відповідно до [7, 15] оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон виконують за визначенням часу настання лише одного граничного стану з вогнестійкості, а саме: за ознакою втрати несучої здатності. Досліджувати час настання граничних станів з вогнестійкості за ознакми втрати цілісності та теплоізолювальної здатності колон немає потреби.

Залізобетонні балки виконують також важливу роль у структурі будівель та споруд, забезпечуючи передавання навантажень і підвищення загальної стійкості конструкції. Їхня основна функція полягає у передаванні навантажень від плит перекриття, яке включає власну вагу, вагу людей, меблів та іншого обладнання, на колони або стіни. Балки рівномірно розподіляють вертикальні та горизонтальні навантаження по всій конструкції, забезпечуючи її стабільність. Таким чином балки мають також лише несучу функцію, як колони, тому їхнє оцінювання вогнестійкості проводять також лише за настанням втрати несучої здатності згідно [7, 15].

Важливим аспектом забезпечення пожежної безпеки є недопущення поширення небезпечних чинників пожежі всередині будівлі, зокрема між приміщеннями і як по горизонтальному, так і по вертикальному напрямках. Для слід використовувати огороджувальні конструкції, які ефективно прого перешкоджають поширенню небезпечних чинників як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Основними такими конструкціями є стіни та плити перекриття, що мають відповідати нормованим класам вогнестійкості з основних граничних станів: несучої урахуванням трьох здатності, теплоізолювальної здатності та цілісності.

Забезпечення цілісності є одним із ключових завдань для огороджувальних конструкцій, оскільки ще до втрати їхньої несучої здатності виникають тріщини, через які небезпечні чинники пожежі можуть проникати до інших приміщень.

Втрата теплоізолювальної здатності настає значно пізніше завдяки теплофізичним характеристикам бетону [15, 26, 36, 40], тому саме втрата цілісності є основною причиною поширення пожежі. Це становить загрозу для життя та здоров'я людей під час пожежі і значно ускладнює проведення аварійнорятувальних робіт спеціальними підрозділами.

Небезпечні чинники пожежі, такі як висока температура, дим та токсичні продукти згоряння, мають тенденцію концентруватися у верхній частині приміщення. Це створює умови підвищеного впливу з боку цих чинників саме у верхній зоні приміщення, де знаходяться горизонтальні огороджувальні конструкції, зокрема плити перекриття.

Тому забезпечення цілісності плит перекриття, а не стін, відіграє ключову роль у недопущенні миттєвого поширення небезпечних чинників пожежі між приміщеннями. Це дозволяє затримати їхнє поширення на початковому етапі пожежі, що забезпечує додатковий час для евакуації людей і створює належні умови для роботи аварійно-рятувальних підрозділів.

## 1.9. Описання поведінки горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі

Для розробки ефективних інженерно обґрунтованих методів прогнозування поведінки горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій важливо розуміти явища, що відбуваються в них під впливом високих температур під час пожежі.

Основними візуальними ефектами, що можна спостерігати як результат механічних аспектів поведінки горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій під час пожежі, є їхні деформація та утворення тріщин. Обидва візуальні ефекти використовуються для фіксації настання граничних станів втрати вогнестійкості за несучою здатністю та цілісністю.

На рис. 1.23 зображена схема, на якій показані основні стадії деформування горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій згідно із результатами досліджень, наведених у роботі [36].





Схема, наведена на рис. 1.23 побудована на графіку максимального прогину горизонтальної огороджувальної залізобетонної конструкції. Наведений графік

може бути розділений на 4 етапи за характером деформування елемента залізобетонної конструкції. Перший етап пов'язаний із першою ділянкою і, частково, другою ділянкою графіка на рис. 1.23. На цьому етапі відбувається попереднє напруження арматури (якщо воно є) та прикладання діючого навантаження.

Другий етап деформування горизонтальної огороджувальної залізобетонної конструкції відповідає початковому вогневому впливу пожежі. Цей етап пов'язаний із 2 ділянкою на графіку максимального прогину, що наведений на рис. 1.22. Для цього етапу характерні малі прогини, оскільки робоча арматура є слабко нагрітою, їй характерні невеликі температурні деформації і незначні погіршення механічних властивостей. Третій етап повністю збігається з третьою ділянкою графіка максимального прогину та характеризується поступовим нагріванням робочої арматури. Як наслідок, відбувається зниження її міцності та модуля пружності, а також збільшення температурних деформацій. Тому ця ділянка графіка набуває форми, близької до прямолінійної.

Четвертий етап пов'язаний із четвертою ділянкою графіка, який має характер швидкого нарощування прогину і відповідає утворенню великих пластичних деформацій в арматурі і стиснутому шарі бетону, що зумовлює утворення пластичного шарніра.

Важливим аспектом поведінки горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій є утворення тріщин. Етапи утворення різних тріщин можна пов'язати характерними етапами деформування таких елементів, які були описані вище. Утворенню тріщин у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій присвячено роботи [111, 112, 126–231].

На першому етапі відбувається виникнення початкового напруженодеформованого стану у результаті створення попереднього напруження арматури і прикладання діючого навантаження. На цьому етапі відбувається утворення невеликих первинних тріщин та пластичних деформацій у стиснутій зоні бетону. На другому етапі зростання тріщин не спостерігається. Для третього етапу характерне поступове зростання тріщин. Із настанням четвертого етапу вважається що може бути досягнутий граничний стан втрати несучої здатності.

На рис. 1.24 наведено розподіл тріщин у залізобетонній порожнистій плиті у різні моменти часу теплового впливу на неї стандартного температурного режиму пожежі. Приклад, наведений на рис. 1.24, можна розглядати як своєрідне узагальнення результатів робіт [138, 226–233], присвячених поведінці порожнистих залізобетонних плит під час пожежі. Для дослідження утворення та росту тріщин була розроблена дуже цікава та унікальна методика вогневих випробувань фрагментів залізобетонних порожнистих плит у вигляді балок, що імітують ділянку плити між порожнинами.



Рис. 1.24. Розподіл тріщин та дефектів у фрагменті залізобетонної плити у різні моменти часу їхніх вогневих випробувань

Наведені на рис. 1.24 розподіли тріщин ілюструють етапи росту тріщин. Показано, що утворена на стадії руйнування фрагмента порожнистої
залізобетонної плити наскрізна тріщина є магістральною і утворена у місцях розташування шарнірів, через які прикладаються зосереджені сили.

Аналіз розподілень тріщин у порожнистих залізобетонних плитах під час пожежі показав, що у таких роботах було мало приділено уваги вивченню умов, коли тріщини стають наскрізними.

За думкою багатьох авторів [111, 112, 226] граничний стан втрати несучої здатності збігається із втратою цілісності за умови відсутності передумов крихкого руйнування.

### 1.10. Методи прогнозування цілісності залізобетонних плит з урахуванням крихкого руйнування бетону

Важливим фактором, що впливає на умови настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за умов пожежі, є наявність крихкого руйнування.

Це явище полягає у відшаруванні поверхневих шарів бетону під час його нагрівання, коли пориста структура матеріалу насичена вологою. Під впливом високих температур волога починає випаровуватись, що спричиняє підвищення тиску водяної пари у порах бетону. В певний момент тиск у порах набуває критичного значення і певна частина поверхневого шару бетону відшаровується, іноді вибухоподібним чином. Це може призводити до передчасного настання граничних станів втрати несучої здатності та цілісності. Це явище добре описано у роботах [232, 240].

У роботі [138] описані теорії виникнення явища крихкого руйнування бетону. На основі цих теорій було запропоновано виконувати розрахунок цілісності залізобетонних огороджувальних конструкцій. У роботі [138] описаний ефективний простий підхід до розрахунку, що знайшов своє відображення в роботах [36, 111, 112]. Цей підхід заснований на застосуванні спеціальної номограми, що наведена на рис. 1.25.



Рис. 1.25. Номограма для визначення істотного ризику крихкого руйнування залізобетонних конструкцій залежно від товщини огороджувального елемента (*d*) та діючого стискального напруження ( $\sigma_{c,fi}$ ): 1 – небезпечна зона; 2 – безпечна зона

Недоліком такої номограми є неможливість врахування вологості бетону та конструктивних особливостей досліджуваної залізобетонної конструкції, зокрема розташування та геометрії армування. Це робить її незручною для застосування.

Альтернативний підхід був запропонований у роботі [138] і базується на використанні іншої номограми, вигляд якої наведено на рис. 1.26.

Цей метод є більш досконалим, оскільки дозволяє якісніше прогнозувати можливість виникнення крихкого руйнування, проте залишає певну невизначеність.

Для прогнозування цілісності залізобетонних огороджувальних конструкцій застосовують метод, описаний у [111].



Рис. 1.26. Номограма для визначення істотного ризику крихкого руйнування залізобетонних конструкцій за вологістю бетону (*u*) огороджувального елемента (*d*) та діючим стискальним напруженням ( $\sigma_{c,fi}$ ): 1 – безпечна зона для елементів товщиною менше 80 мм; 2 – безпечна зона для елементів товщиною менше 100 мм; 3 – безпечна зона для елементів товщиною менше 120 мм; 4 – небезпечна зона; 5 – безпечна зона для переармованих елементів

З врахуванням положень цього методу цілісність контролюється за допомогою спеціального коефіцієнта, який визначається за формулою:

$$F = b_c \alpha_{ct} E_{s,\theta} \rho_c / K_1 \lambda_n \tag{1.14}$$

де  $b_c$  – коефіцієнт пропорційності, рівний 1,16·10<sup>-2</sup> Вт·м<sup>3/2</sup>;

 $\alpha_{ct} (250 \ ^{\circ}\text{C}) = 9 \cdot 10^{-6} \ ^{\circ}\text{C}^{-1}$  коефіцієнт температурного розширення бетону [111];  $E_{c,\theta}$  – початковий модуль пружності бетону, МПа;  $\rho_c = 2150 \ \text{кг/m}^3$  – густина бетону у сухому стані, кг/м<sup>3</sup>, що дорівнює густині бетону природної вологості за відніманням випареної води у кількості 150 кг/м<sup>3</sup>;

 $K_1 = 0,47 \text{ MH} \cdot \text{M}^{3/2}$  – коефіцієнт псевдоінтенсивності напружень у бетоні [111];  $\lambda_n = 1.5 \text{ Bt} \cdot \text{M} \cdot ^{\circ}\text{C}$  – коефіцієнт теплопровідності бетону за температури 250 °C

[111].

Якщо параметр  $F \in$  менший за (1.14), то це означає, що граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності під час виникнення явища крихкого руйнування бетону не настає.

Аналіз результатів, отриманих за цими методами, дозволяє зазначити, що за умови дотримання вимог щодо нормального кондиціювання конструкцій і відсутності надмірної вологості ризик втрати цілісності залізобетонних огороджувальних конструкцій через крихке руйнування бетону є невисоким. Це пояснює факт, що такі методи не увійшли до норм [10–15] для прогнозування граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

## 1.11. Висновки до розділу та обґрунтування мети та завдання дослідження

Підсумовуючи викладене у цьому розділі, можна зазначити, що методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій достатньо розвинуті, особливо у частині аналізу умов настання граничних станів втрати теплоізолювальної та несучої здатності. Проте, стосовно оцінювання можливості настання втрати вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності існуючі методи працюють недостатньо ефективно і мають певну кількість недоліків:

 експериментальний метод оцінювання вогнестійкості огороджувальних залізобетонних будівельних конструкцій на основі вогневих випробувань, незважаючи на його наочність та ефективність, не дозволяє чітко зафіксувати ознаки настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності в процесі проведення випробувань та після них, за винятком коли наскрізні ушкодження та/або тріщини набувають явного та широкого розповсюдження, оскільки необігрівна поверхня конструкції покрита вантажами для відтворення механічного навантаження, як під час реальної роботи конструкції;

- розрахункові методи оцінювання вогнестійкості огороджувальних залізобетонних будівельних конструкцій на сучасному етапі їхнього високого розвитку у своїй більшій частині не дозволяють зафіксувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, за винятком методів, що використовують у якості критерію настання такого стану виникнення явища крихкого руйнування бетону;
- явище крихкого руйнування виникає за екстраординарних умов, коли поєднується підвищена вологість, певні геометричні параметри горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій та параметри армування, тому вважається за можливе введення гіпотези збігання для більшості конструкцій, що працюють у нормальних умовах, граничних станів з вогнестійкості за ознаками втрати цілісності та несучої здатності;
- розрахункові методи оцінювання вогнестійкості огороджувальних залізобетонних конструкцій мають обмежене застосування ДЛЯ прогнозування граничного стану за ознакою втрати цілісності в умовах пожежі. Це зумовлено тим, що в існуючих підходах здебільшого приймається гіпотеза збігання моменту втрати цілісності та несучої здатності для більшості конструкцій, які працюють у нормальних умовах. Крім того, використання існуючих критеріїв визначення втрати цілісності ускладнює можливість їхнього застосування для розрахункового прогнозування цього граничного стану;
- відсутність надійних критеріїв, що дозволили б зафіксувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за умови відсутності крихкого руйнування;
- обмеження теоретичних уявлень про стан, за якого тріщини у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях стають наскрізними, а також питання щодо збереження їхньої несучої здатності у такому випадку протягом нормованого часу;

 відсутності надійних осяжних розрахункових методик проєктування вогнестійких горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій з точки зору умов зберігання їхньої цілісності в умовах впливу пожежі.

Враховуючи викладене, слід зазначити, що розроблення осяжних інженерних розрахункових методів оцінювання вогнестійкості огороджувальних залізобетонних конструкцій за встановленням умов настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності та розвиток основ теоретичної та критеріальної бази для його прогнозування є актуальною науково-технічною проблемою, розв'язання якої, дозволяє надати інструменти для проєктування вогнестійких залізобетонних огороджувальних конструкцій, завдяки чому створити передумови для забезпечення пожежної безпеки у сучасних об'єктах будівництва.

У зв'язку із цим були сформульовані мета та завдання дисертаційного дослідження.

Мета дослідження – розробка ієрархічної системи методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності на основі математичних моделей та закономірностей утворення тріщин та дефектів в умовах пожежі.

#### Основні завдання дослідження.

1. Проаналізувати методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності та шляхів їхнього удосконалення.

2. Виконати математичне моделювання поведінки фрагменту залізобетонної порожнистої плити для виявлення особливостей механізму руйнування таких будівельних конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою методу скінченних елементів.

3. Дослідити поведінку залізобетонної порожнистої плити в умовах

вогневих випробувань для верифікації розробленої математичної моделі з метою виявлення особливостей механізму руйнування у таких плитах під час впливу стандартного температурного режиму пожежі.

4. Розробити математичні моделі для проведення досліджень щодо руйнування залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою методу скінченних елементів.

5. Розробити спрощені методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності на основі створення математичних моделей, які визначають критерії настання граничного стану для залізобетонних порожнистих та ребристих плит.

6. Виявити закономірності утворення наскрізних тріщин у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях залежно від конструктивних параметрів та параметрів впливу пожежі на основі проведених досліджень поведінки залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу пожежі.

7. Розробити ієрархічну систему методів для оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності на основі проведених досліджень поведінки залізобетонних порожнистих та ребристих плит в умовах впливу пожежі.

8. Розробити процедуру реалізації розробленої ієрархічної системи методів для оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності.

### РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

2.1. Основні положення підходу щодо математичного моделювання поведінки горизонтальних огороджувальних конструкцій в умовах впливу пожежі

Основна мета математичного моделювання поведінки залізобетонних плит під час пожежі полягає у створенні засобів для відстеження закономірностей розвитку та геометричної конфігурації тріщин у цих плитах, як підґрунтям для розробки критеріїв, які визначають умови їх наскрізного проростання.

Ці критерії мають бути зрозумілими, а їхнє встановлення осяжним з точки зору набору параметрів, визначеними в процесі моделювання.

Основним інструментом для дослідження розвитку та геометричної конфігурації тріщин можуть бути програмні комплекси, що реалізують явний метод розрахунку для моделювання мультифізичних процесів, зокрема механічної поведінки твердого тіла під час його деформування та нагрівання. Застосування такого підходу для зазначеного класу задач широко описані у роботах [221–245].

Згідно із даними вказаних робіт для дослідження росту та геометричної конфігурації тріщин застосовуються математичні моделі, що описують процеси деформування та руйнування твердого тіла, які поєднують загальні рівняння динаміки, засновані на консервативних законах механіки, та рівняння напруженодеформованого тіла. В роботах [119–133] доведена успішність такого підходу.

Зрозуміло, що в таких умовах мають бути сформульовані такі граничні умови, які дозволили б врахувати етапи прикладання до залізобетонних плит впливів різного типу і у тій послідовності, що відтворювала б реальні процеси. Тобто на першому етапі мають бути прикладені власна вага та попереднє напруження, на другому етапі – діюче навантаження, і на останньому етапі має бути прикладений тепловий вплив, який відтворює дію пожежі. Такі процеси мають певну протяжність у часі, проте, якщо не ставити механічні властивості матеріалів у залежність від швидкості деформування, таке припущення дозволяє використовувати фактор часу як умовний параметр, що дозволяє забезпечити певну плавність прикладання відповідних навантажень. При цьому треба виключити динамічний вплив швидкості переміщень точок механічної системи, за допомогою відповідних програмних засобів. Такий спосіб широко застосований у роботах [124–133]. Ще однією перевагою введення такого припущення та встановлення таких умов розрахунку є можливість розділити як окремі теплотехнічну та статичну задачі.

Враховуючи викладене, для розв'язання основної статичної задачі необхідно ввести як початкові дані температури нагрівання внутрішніх шарів залізобетонних плит з урахуванням теплового впливу. Для цього має бути вирішена теплотехнічна задача, що має бути розв'язана на початковому етапі. Використовуючи досвід, поданий у роботах [29–36, 119–133], були сформульовані основні положення та посилання, які викладені нижче.

Для моделювання напружено-деформованого стану (НДС) у залізобетонних плитах, був використаний узагальнений теоретично-розрахунковий інженерний підхід, який заснований на таких основних посиланнях.

1. Для математичного моделювання НДС деформованого твердого тіла застосовується узагальнений теоретичний підхід, який ґрунтується на ініціації переміщень точок механічної системи твердих деформованих тіл із застосуванням системи загальних рівнянь динаміки та рівнянь НДС, що викликається даними переміщеннями. Ці рівняння інтегруються за допомогою методу скінченних елементів.

2. Для моделювання бетонної основи залізобетонних плит застосовуються тривимірні масивні скінченні елементи гексаедричної форми із вісьма вузлами.

3. Для моделювання сталевої арматури у вигляді арматурних стержнів використовується одновимірні лінійні елементи із визначеною формою перерізу [108].

4. Для описання нелінійної поведінки бетону під час діючих навантажень

застосовується модель пластична модель ушкодженого бетону, описана у роботах Grassl та Jirasek [242], яка ґрунтується на основі нелінійних діаграм деформування із спадними гілками, і враховує крихке та в'язке руйнування бетону на основі завдання ефективного пластичного напруження на основі співвідношень пластичної та пружної деформацій.

5. Як модель матеріалу сталевої арматури використовується матеріал із можливістю пластичних деформацій, що описується білінійними діаграмами деформування типу Прандтля. Ці діаграми включають лише ділянку зростання та горизонтальну ділянку з граничною деформацією 15 % [119–133], з урахуванням температурного розширення та зниження механічних характеристик арматури під час високотемпературного нагрівання.

6. Для описання взаємодії між поверхнями спирання залізобетонних плит та їхніми опорними кінцями використовується модель контактної взаємодії. Поверхні спирання за прийнятими припущеннями складаються з абсолютно недеформованого матеріалу. Прикладання навантаження має динамічну історію та відбувається поступово протягом визначеного часу.

7. Навантаження на плиту та температурні навантаження прикладаються до плити послідовно, відтворюючи реальну черговість. Температурні навантаження прикладаються пропорційно за часом після прикладання власної ваги, попереднього напруження та діючого навантаження.

8. Значення температур для формування температурного навантаження є результатом розв'язання теплотехнічної задачі, заснованої на інтегруванні нестаціонарного рівняння теплопровідності у вигляді (1.12).

9. Параметри, які отримуються в процесі розрахунку однозначно показують положення та геометричну конфігурацію кожної основної окремої тріщини.

Для вивченні процесу деформування залізобетонних плит використовується комп'ютерна система LS-DYNA (Livermore Software Dynamic), яка розроблена фахівцями Національної Ліверморської лабораторії ім. Лоуренса, Каліфорнійського університету США (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL). У цей момент код комп'ютерної системи LS-DYNA є частиною комплексу

розрахункових інженерних систем ANSYS Workbench, і також входить як блок до окремої частини цього комплексу ANSYS APDL.

При цьому пре/постпроцесор даної системи надається як безкоштовний програмний додаток розробниками, а ліцензія на розрахунки створених моделей надається в програмному забезпеченні ANSYS Workbench або ANSYS APDL. Комп'ютерна система LS-DYNA призначена для моделювання імпульсних впливів на конструктивні системи та аналізу їхніх наслідків на основі рівнянь динаміки в скінченно-елементній реалізації. Вона забезпечує контроль контактної взаємодії та зусиль відклику за допомогою методу штрафних функцій, а також підтримує динамічне перебудування сітки скінченних елементів при її резонансі чи розділенні на окремі частини, які можуть продовжувати взаємодію між собою.

## 2.2. Базова математична модель явного методу розрахунку динамічних систем деформованих тіл

Основою для розрахунків є розв'язання задачі деформування зразків у постановці руху деформованого тіла як динамічної системи. У даній постановці схема окремого твердого деформованого тіла в початковому стані в початковий час t = 0 показана на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Початковий недеформований стан і поточний деформований стан твердого тіла під час його руху

Окреме тверде деформоване тіло має початковий об'єм  $\Omega_0$ , який обмежений поверхнею  $\Gamma_0$ . У поточному положенні тіла в заданий час *t* набутий тілом об'єм позначений як  $\Omega$ , із граничною поверхнею  $\Gamma$ . Під час руху тіла з положення  $\Omega_0$  у положення  $\Omega$ , довільна точка з координатами *X*, яка в початковому положенні належить до тіла із об'ємом  $\Omega_0$ , буде належати тому ж тілу у разі набуття ним об'єму  $\Omega$  у поточному положенні з координатами *x*.

Фундаментальні рівняння, які описують стан твердого тіла як динамічної системи, отримані шляхом врахування законів динаміки механічної системи и законів збереження відповідно до робіт Belytschko, Flangan та ін. [241–245].

У такому разі узагальнене рівняння збереження імпульсу записується у вигляді:

$$\sigma_{ij,i} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{x}_i, \tag{2.1}$$

де  $\sigma_{ij, i}$  – тензор напружень Коші у заданій точці, що належить тілу;  $\rho$  – густина матеріалу у заданій точці, що належить тілу;  $\rho \cdot f_i$  - зовнішні сили, які діють на тіло через задану точку;  $\ddot{x}_i$  – прискорення заданої точки, що належить тілу.

Рівняння збереження мас набуває вигляду:

$$\rho \cdot \det(\mathbf{J}) = \rho_0, \tag{2.2}$$

де *ρ*<sub>0</sub> – густина матеріалу тіла у недеформованому початковому стані; det(**J**) – визначник тангенціальної матриці жорсткості (Якобіан).

Рівняння, яке виражає закон збереження енергії, є сумою кінетичної та внутрішньої енергій, що повинна дорівнювати загальній сумі робіт зовнішніх сил має такий вигляд:

$$P^{int} + P^{kin} = P^{ext} + P^{heat}, (2.3)$$

121

де *P<sup>int</sup>* – внутрішня енергія, що враховує енергію деформації всередині тіла; *P<sup>kin</sup>* – кінетична енергія руху тіла;

*P*<sup>*ext*</sup> – робота зовнішніх сил, що діють на тіло;

*Р*<sup>*heat*</sup> – енергія, внесена або втрачена через теплообмін.

Загальна кінетична енергія тіла визначається за таким виразом:

$$P^{kin} = 0.5 \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} d\Omega , \qquad (2.4)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу;

*v* – вектор швидкості;

 $\Omega$  – область об'єму тіла.

Загальна внутрішня енергія деформованого тіла визначається за рівнянням:

$$P^{ext} = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma, \qquad (2.5)$$

де *v* – вектор швидкості;

 $\rho$  – густина матеріалу;

*b* – вектор масових сил (наприклад, сила тяжіння);

 $\Omega$  – область об'єму тіла;

t – вектор напружень на поверхні, Н/м<sup>2</sup>;

Г-область поверхні тіла.

За відсутності внутрішніх та зовнішніх джерел теплової енергії, рівняння збереження енергії у відповідності до робіт [241–245] набуває вигляду:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho w^{int} + (0.5 \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} d\Gamma, \qquad (2.6)$$

де  $\Omega$  – область, що займає тіло;

 $\Gamma$  – межа області  $\Omega$ ;

 $\rho$  – густина матеріалу;

w<sup>int</sup> – внутрішня енергія на одиницю маси;

*v* – швидкість частинок матеріалу;

*b* – вектор масових сил (наприклад, сили тяжіння);

*t* – поверхневі напруження.

Рівняння балансу енергії у модифікованому вигляді для деформованого твердого тіла у поточному положенні може бути подане у такому вигляді:

$$\rho \dot{w}^{int} = 0.5 \sigma_{ij} \left[ \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right], \qquad (2.7)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу;

w<sup>int</sup> – внутрішня енергія на одиницю маси;

 $\sigma_{ij}$  – компоненти тензора напружень;

*v<sub>i</sub>*, *v<sub>j</sub>* – компоненти швидкості;

*x<sub>i</sub>, x<sub>j</sub>* – координати у просторі.

Граничні умови обмеження руху твердого деформованого тіла  $\Gamma_f$  записуються у вигляді формули:

$$\sigma_{ij}n_j = t_i(t), \tag{2.8}$$

де  $n_j$  – вектор нормалі до граничної поверхні твердого деформованого тіла, спрямованої назовні.

 $t_i(t)$  – поверхневе навантаження, що може змінюватися з часом.

Щодо граничних умов, які встановлюють параметри деформації на граничній поверхні твердого деформованого тіла, може бути записана формула:

$$x_i(\mathbf{X},t) = \bar{x}_i(t), \tag{2.9}$$

де  $x_i(X,t)$  – положення точки тіла в деформованому стані у момент часу;

Х-координати тієї ж точки у початковому стані;

 $\overline{x}_i(t)$  – відоме положення точки на граничній поверхні.

За умови ініціювання контактної взаємодії між деформованими тілами, сумісні граничні умови набувають такого вигляду:

$$\left(\sigma_{ij}^{+} - \sigma_{ij}^{-}\right) n_{j} = 0, \qquad (2.10)$$

де  $\sigma^{ij+}$  *i*  $\sigma^{ij-}$  – тензори напружень у точках, що прилягають до межі контакту з обох боків;

*n<sub>i</sub>* – одиничний вектор нормалі до контактної поверхні.

Якщо застосовувати принцип можливих переміщень  $\delta x_i$ , рух твердих деформованих тіл, які відчувають контактну взаємодію одне з одним, може бути записаний через рівняння збереження віртуальних робіт:

$$\int_{\Omega} \left[ \rho \ \ddot{x}_i + \sigma_{ij,j} - \rho \ f_i \right] \, \delta x_i d\Omega + \int_{\Gamma_f} \left[ \sigma_{ij} n_j - t_i \right] \delta x_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} \left( \sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^- \right) n_j \delta x_i d\Gamma = 0 \,, \tag{2.11}$$

де:  $\rho \ddot{x}_i$  – інерційні сили;

 $\sigma_{ij,j}$  – внутрішні напруження;

ρ f<sub>i</sub> – зовнішні об'ємні сили (наприклад, гравітація);

 $\sigma_{ij}n_j - t_i - p$ ізниця між напруженнями та заданими граничними силами на поверхні;  $\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^- -$ умова контактної взаємодії на поверхні;

 $\delta x_i$  – віртуальні переміщення, які використовуються в принципі можливих переміщень.

Покладаючи, що сума можливих робіт має бути дорівнювати нулю, виконуючи певні перетворення рівняння (2.11), останнє може бути записане у вигляді модифікованого виразу [241–245]:

$$\int_{\Omega} \rho \, \ddot{x}_i \delta x_i d\Omega + \int_{\Omega} \sigma_{ij,j} \delta x_i d\Omega - \int_{\Omega} \rho \, f_i \delta x_i d\Omega - \int_{\Gamma_f} t_i \delta x_i d\Gamma - \int_{\Gamma_c} t_i^c \delta x_i d\Gamma = 0, \quad (2.12)$$

 $\operatorname{de} \int_{\Omega} \rho \ddot{x}_i \delta x_i d\Omega$  – інерційний член, що відповідає масовій інерції деформованого

тіла;

 $\int_{\Omega} \sigma_{ij,j} \delta x_i d\Omega$  – член внутрішніх напружень, що враховує внутрішні сили

(напруження  $\sigma_{ij,j}$ ) та їхній градієнт у тілі;

 $\int_{\Omega} \rho f_i \delta x_i d\Omega$  – член зовнішніх сил, що описує дію зовнішніх масових сил  $f_i$ ;  $\int_{\Gamma_f} t_i \delta x_i d\Gamma$  – член поверхневих сил, що описує дію зовнішніх поверхневих сил  $t_i$  на межі  $\Gamma$ ; межі  $\Gamma$ ;  $\int_{\Gamma_c} t_i^c \delta x_i d\Gamma$  – член контактної взаємодії, що враховує контактні сили  $t_i^c$  на межі

взаємодії між тілами Г<sub>с</sub>.

Таким чином, отримане рівняння динамічної рівноваги враховує вплив зовнішніх та внутрішніх сил, забезпечуючи основу для явного чисельного інтегрування руху механічних систем. Явний метод розрахунку дозволяє ефективно визначати параметри руху та напружено-деформованого стану деформованих тіл.

# 2.3. Скінченно-елементна апроксимація основних рівнянь математичної моделі динамічної взаємодії механічних систем

Рівняння для здійснення інтерполяції розподілень відповідних даних у внутрішньому просторі, що обмежений границями скінченного елементу (CE) має такий вигляд:

$$x_i(\mathbf{X},t) = \overline{x}_i(\mathbf{X}(\xi,\eta,\zeta),t) = \sum_{j=1}^m \phi_j(\xi,\eta,\zeta) x_i^j(t), \qquad (2.13)$$

де  $\phi_j$  – параметрична функція форми (параметри  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ ) m – кількість вузлів згідно із геометричною формою CE;  $x_i^j$  – поточна координата вузла за даною віссю координат.

Потенціальна енергія на можливих переміщеннях для СЕ набуває вигляду:

$$\partial \Pi_e = \int_{\Omega_e} \rho \ \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho \ f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma,$$
(2.14)

де  $\Phi_i^e = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)_i^e$ .

Для всього набору СЕ має бути застосований принцип віртуальних переміщень. За такого підходу рівняння збереження загальної енергії тіла, із накладеною сіткою СЕ записується у вигляді формули:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[ \int_{\Omega_e} \rho \ \ddot{x}_i \Phi_i^e d\Omega + \int_{\Omega_e} \sigma_{ij} \Phi_{ij}^e d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho \ f_i \Phi_i^e d\Omega - \int_{\Gamma_e} t_i \Phi_i^e d\Gamma \right] = 0.$$
(2.15)

У матричній формі для скінченних елементів рівняння (2.15) набуває вигляду:

$$\sum_{e=1}^{en} \left[ \int_{\Omega_e} \rho \mathbf{N}^{\mathrm{T}} \mathbf{N} \, \mathbf{a}_e d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\sigma} \, d\Omega - \int_{\Omega_e} \rho \, \mathbf{N}^{\mathrm{T}} \mathbf{b} \, d\Omega - \int_{\Gamma_e} \mathbf{N}^{\mathrm{T}} \mathbf{t} \, d\Gamma \right] = 0, \qquad (2.16)$$

де N –матриця інтерполяції параметричними функціями форми CE;

 $\sigma$ - вектор напружень;

**В** – матриця жорсткості;

 $a_e$  – вектор прискорень вузлів;

**b** – вектор навантажень у вузлах;

t – вектор тягових сил.

Отримане рівняння в матричній формі описує дискретизовану систему на основі методу скінченних елементів, що дозволяє формалізувати динамічну взаємодію механічних систем. Така апроксимація забезпечує можливість чисельного розв'язання задач механіки деформованих тіл, враховуючи як внутрішні сили, так і зовнішні навантаження.

2.4. Математична модель щодо контактної взаємодії

На рис. 2.2 наведена розрахункова схема контактної взаємодії двох деформованих тіл у разі їхнього дотикання і подальшого взаємного проникнення під час їхнього руху.



Рис. 2.2. Схема контактної взаємодії між твердими деформованими тілами

Для ідентифікації моменту початку контактної взаємодії двох тіл, що контактують між собою фіксується виконання умови Герца-Синьоріні-Мора [241–245]:

$$g \ge 0, \ \lambda \ge 0, \ g\lambda \ge 0, \tag{2.17}$$

де g – величина зазору, що обчислюється за виразом:

$$g\left(\mathbf{x}^{i},t\right) = \left(\mathbf{x}^{i} - \mathbf{x}^{j}\right)^{\mathrm{T}} \mathbf{n}, \qquad (2.18)$$

де  $x^i - x^j$  – координати відповідних точок контактуючих тіл; *n* – нормальний вектор до контактної поверхні. Схема ідентифікації геометричних параметрів тіл, що контактують між собою, подана на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Схема ідентифікації геометричних параметрів контакту поверхонь твердих деформованих тіл

Для введення до математичної моделі сил тертя під час контактній взаємодії використовується узагальнений закон Кулона. За таких передумов модуль дотичної швидкості визначається за формулою:

$$\dot{\boldsymbol{\mu}}\left(\mathbf{x}^{i},t\right) = \left(\dot{\mathbf{u}}^{i} - \dot{\mathbf{u}}^{j}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{s},\qquad(2.19)$$

де  $\dot{u}^i$ ,  $\dot{u}^j$  – швидкості відповідних точок тіл, що контактують між собою; *s* – дотичний вектор до контактної поверхні.

Вираз для узагальненого закону Кулона набуває такого вигляду:

$$|\tau| \le 1$$
  
якщо  $|\tau| < 1$  приймається  $\dot{u} = 0$  (2.20)  
при  $|\tau| < 1$  приймається  $sign(\dot{u}) = sign(\tau)$ 

Параметр тобчислюється за формулою:

$$\tau = \frac{\eta}{\mu\lambda},\tag{2.21}$$

де η – певний коефіцієнт, що враховує в'язкі або контактні властивості матеріалів;

 $\mu$  – коефіцієнт сил тертя;

λ – характеристична довжина контакту.

До математичного моделювання контактної взаємодії між граничними поверхнями СЕ використовується метод штрафних функцій та метод множення Лагранжа [241–245]. Для описання взаємодії між сегментами поверхні СЕ, що обмежується чотирма вузлами, застосовується алгоритм обчислювальних процедур, викладений нижче.

1. Визначається пара «підлеглий вузол – головний сегмент» скінченного елемента (СЕ), суміжного до поверхонь тіла. При цьому перевіряється відповідність умові положення проєкції підлеглого вузла на головний сегмент у першому або четвертому квадранті локальної системи координат головного сегмента.

Відповідна проєкція вузла на сегмент розглядається як точка контакту, а дистанція між підлеглим вузлом і цією точкою є проєкційною відстанню.

Аналіз взаємодії вузла та сегмента показує, що площа сегмента збільшується на малу величину (близько 2%) для підвищення надійності обчислень контактного алгоритму.

2. Отримується набір координат контактної точки у локальній системі, зв'язаної із головним сегментом.

3. Обчислюється проєкційна відстань у локальній системі, зв'язаній із головним сегментом.

4. Якщо проекційна відстань є від'ємною, її розглядають як глибину пенетрації. На основі цього значення визначається сила, яка прикладається до підлеглого вузла, і обчислюється за формулою [241–245]:

$$f_s = K_c \cdot \delta, \tag{2.22}$$

129

К<sub>с</sub> – контактна жорсткість;

 $\delta$ – глибина пенетрації.

5. У вузлах головного сегмента визначаються сили контакту за функцією форми СЕ, що залежать від локації контактної точки у місцевій системі координат головного сегмента. Рівняння для описання функції форми СЕ подані нижче [241–245]:

$$f_m^i = N_i(\xi, \eta) \cdot f_s \, \exists e \qquad \begin{cases} N_1 = 0.25(1+\xi)(1+\eta) \\ N_2 = 0.25(1+\xi)(1+\eta) \\ N_3 = 0.25(1+\xi)(1+\eta) \\ N_4 = 0.25(1+\xi)(1+\eta) \end{cases}$$
(2.23)

Контактна жорсткість отримується за формулою:

$$K_c = \frac{f_s A^2 k}{V_e},\tag{2.24}$$

де  $f_s$  – значення штрафного фактора;

А – площа поверхні головного сегмента;

*k* – об'ємний модуль пружності;

 $V_e$  – об'єм СЕ, із даним сегментом.

Цей підхід забезпечує можливість ітераційного уточнення контактних умов у процесі моделювання.

#### 2.5. Явний чисельний метод апроксимації рівнянь динаміки

Визначення величин швидкостей вузлових точок СЕ у разі використання

явного метода обчислень рівнянь динаміки проводиться із застосуванням виразу [241–245]:

$$\mathbf{v}^{n+0,5} = \left(\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n\right) / \Delta t^{n+0,5} \Longrightarrow \mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t^{n+0,5} \mathbf{v}^{n+0,5}, \qquad (2.25)$$

де  $v^{n+0,5}$  – швидкість у момент часу n+0,5;  $u^{n+1}$ ,  $u^n$  – положення в моменти часу;  $\Delta$ t– крок інтегрування за часом між n та n+1.

Обчислення переміщень вузлів СЕ відбувається із застосуванням рівняння:

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^0 + \mathbf{u}^{n+1}, \qquad (2.26)$$

де  $x^{n+1}$  – координати вузлів на кроці n+1;  $x^0$  – початкові координати вузлів;  $u^{n+1}$  – переміщення вузлів на кроці n+1.

Базовим рівнянням для проведення визначення прискорень вузлів СЕ при наближенні часової похідної за допомогою скінченних різниць виступає вираз:

$$\mathbf{a}^{n} = \left(\mathbf{v}^{n+0.5} - \mathbf{v}^{n-0.5}\right) / \Delta t^{n} \Longrightarrow \mathbf{v}^{n+0.5} = \mathbf{v}^{n-0.5} + \Delta t^{n} \mathbf{a}^{n}, \qquad (2.27)$$

де  $v^{n+0,5}$  – швидкість вузла на півкроках n+0,5 та n=0,5;  $\Delta t^n$  – часовий крок.

Прискорення вузлів СЕ визначаються за допомогою розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь у разі використання обернення матриці *М*:

$$\mathbf{a}^n = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}^n, \qquad (2.28)$$

де  $M^{1}$  – масова матриця системи, яка отримується шляхом інтегрування за об'ємом кожного скінченного елемента.

*F*<sup>*n*</sup> – вектор вузлових сил на часовому кроці *n*, що складається з суми зовнішніх та внутрішніх силових впливів.

На кожному кроці інтегрування часовий крок визначається шляхом використання числа Куранта-Фрідріхса-Леві, яке обчислюється за виразом:

$$\Delta t \le \Delta t_{crit} = \min \frac{l_e}{c_e},\tag{2.29}$$

де  $l_e$  – просторовий крок сіткової моделі СЕ;  $c_e$  – швидкість поширення хвиль у матеріалі, що отримується за формулою:

$$c_e = \sqrt{E_e/\rho_e} \,, \tag{2.30}$$

де  $E_e$  – модуль пружності елемента;  $\rho_e$  – густина матеріалу елемента.

Для моделювання напружено-деформованого стану у бетоні застосовуються гексаедричні CE типу SOLID із вісьмома вузловими точками. Геометрична конфігурація елементу такого типу подана на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Геометрична конфігурація гексаедричного скінченного елементу типу SOLID із вісьма вузловими точками

Для даного типу СЕ вирази для обчислення координат вузлів форми (2.26)

$$x_i(\mathbf{X},t) = \overline{x}_i(\mathbf{X}(\xi,\eta,\zeta),t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi,\eta,\zeta) x_i^j(t), \qquad (2.31)$$

де  $\phi_j$  – параметрична функція форми СЕ для *j*-того вузла, що для СЕ типу SOLID описується за рівнянням:

$$\phi_j = 0.125 (1 + \xi \xi_j) (1 + \eta \eta_j) (1 + \zeta \zeta_j), \qquad (2.32)$$

Параметри  $\xi_j$ ,  $\eta_j$ ,  $\zeta_j$  визначаються відповідно до схеми на рис. 2.4.

Для описаного типу CE матриця інтерполяційних функцій форми записується через матричне рівняння:

$$\mathbf{N}(\xi,\eta,\zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & \cdots & 0 & 0\\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & \cdots & \phi_8 & 0\\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \phi_8 \end{bmatrix},$$
(2.33)

Компоненти напруженого стану записуються у вигляді вектора:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z & \tau_{xy} & \tau_{yz} & \tau_{zx} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}, \qquad (2.34)$$

де  $\sigma_{x}, \sigma_{y}, \sigma_{z}$  – нормальні напруження у відповідних координатних напрямах,  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – дотичні напруження.

Для моделювання НДС у арматурних стержнях використовуються одновимірні балкові СЕ, запропоновані у роботах Belytschko та ін. [241–245]. На рис. 2.5 показані етапи переміщень у обертальній системі координат.

Особливістю такого типу СЕ є описання його руху та деформування за допомогою обертальної або коротаційної системи координат. Загалом існує два типи систем координат – система координат, пов'язана з однією з точок СЕ (у

цьому випадку т. І) у початковому положенні  $\overline{\mathbf{A}} = (\overline{A}_x, \overline{A}_y, \overline{A}_z)$  та системи координат  $\hat{\mathbf{A}} = (\hat{A}_x, \hat{A}_y, \hat{A}_z)$  балки у повернутому та деформованому станах. За допомогою цих систем координат та матричних операторів, які складаються з векторів, що показані на рис. 2.5, можна описати їхній рух та деформування у глобальній системі координат у дискретній за часом Лагранжевій постановці.



Рис. 2.5. Скінченний елемент типу балки Беличка у обертальній системі координат: *а* – початкове положення; *б* – поворот балки у недеформованій фазі; *в* – поворот балки із деформуванням

Деформації для балок визначаються подібно до того як визначаються деформації за методиками опору матеріалів.

#### 2.6. Метод математичного моделювання поширення тріщин у матеріалі

Для поділу матеріалу на частини у випадку досягнення в ньому руйнівних

деформаційних або силових факторів залежно від використовуваної теорії міцності застосовується СЕ незалежний метод, запропонований у роботі [132]. Цей метод застосовує алгоритм перебудови сітки в місці утвореного дефекту. Алгоритм поділу на різні частини сітки СЕ полягає в проведенні наступних процедур.

1. Визначаються вузли, де параметр, що є опорним для прийнятої теорії міцності матеріалу, досягає граничних значень у даній моделі.

2. Через отримані точки проводиться площина тріщини.

3. Якщо площина тріщини проходить близько існуючого вузла, положення тріщини й положення вузла коректується для створення коректної сітки поблизу знову утворених поверхонь.

4. Елементи із тріщиною видаляються у разі використання певної геометрії площини тріщини. Це досягається перевизначенням нових вузлів на поверхнях, розділених СЕ площиною тріщини, на останньому кроці.

5. Відбувається відновлення бази даних при перевизначенні ідентифікованих вузлів і елементів, що примикають до поверхонь берегів тріщини.

6. Утворені поверхні й вузли додаються в новий список контактних поверхонь і вузлів.

# 2.7. Математична модель поведінки бетону в умовах механічного навантаження

Згідно з термінологією, прийнятою в документації до програмного комплексу LS-DYNA, математичний опис феноменології поведінки матеріалу під час навантаження, що змінюється від нуля до значень, які можуть бути порівнянні із граничними, або перевищувати їх, називається математичною моделлю або просто моделлю матеріалу. Сюди входять математичні співвідношення теорій міцності й пластичності. Можливості LS-DYNA для опису властивостей залізобетону дозволяють розглядати його як суцільний матеріал, а арматурні включення – як додаткову умову анізотропії та модифікованої міцності, розподіленої по всьому об'єму. Також є можливість представлення арматурних стрижнів за допомогою окремих типів елементів – балкових або об'ємних. Істотною перевагою системи LS-DYNA є те, що елементи різних типів не обов'язково повинні сполучатися у спільних вузлах, що суттєво спрощує побудову скінченно-елементних схем. Сполучення різних типів елементів можливо за допомогою теорії Лагранжа. Тому сама модель залізобетону буде багатоелементною і багатоматеріальною.

Для опису бетону використано модель неперервної поверхні руйнування з обмежувальним куполом, що в системі LS-DYNA має номенклатурне позначення CSCM (type No 159, Continuous Surface Cap Model). Ця модель детально описана в роботах Murray, Abu-Odeh i Bligh [254].

Основною особливістю такої моделі є те, що комбінації напружень, за яких матеріал здатний опиратися, обмежені особливою поверхнею, яка скомпонована з поверхні текучості й крихкого руйнування. Тобто така поверхня охоплює всі випадки руйнування бетону комплексно й установлює таким чином умови або крихкого або в'язкого руйнування. На рис. 2.6 показаний загальний вигляд геометрії такої поверхні.



Рис. 2.6. Загальний вид геометричної конфігурації поверхні руйнування бетону

Слід зазначити, що частини поверхні руйнування є нерівнозначними, і тому така поверхня розділяється на зони – зону руйнування внаслідок деформацій

зсуву і зону зміцнення у разі ущільнення бетону внаслідок стиску, які сполучені між собою й утворюють гладку й суцільну поверхню. На рис. 2.7 зображений меридіональний переріз такої поверхні.



Рис. 2.7. Меридіональний переріз поверхні руйнування бетону

Поверхня руйнування побудована за допомогою трьох інваріантів напружено-деформованого стану:

$$f(J_1, J'_2, J'_3, \kappa) = J'_2 - \Re^2 F_f^2 F_c$$
(2.35)

де  $J_1, J'_2, J'_3$  – відповідно перший, другий і третій інваріанти тензора напружень;  $F_c$  – функція поверхні купола зміцнення у разі стискання;

- *F<sub>f</sub>* функція поверхні руйнування внаслідок зсуву;
- *к* величина першого інваріанта в місці сполучення поверхонь;
- Я трьохінвариантний знижувальний коефіцієнт Рубіна.

В процесі розрахунків дані тензора напружень оновлюються, у результаті чого визначаються поточні величини інваріантів, позначувані як  $J_1^T$ ,  $J'_2^T$ ,  $J'_3^T$ . За умови, що  $f(J_1^T, J'_2^T, J'_3^T, \kappa^T) \le 0$ , напружено-деформований стан розглядається як пружний. Якщо  $f(J_1^T, J'_2^T, J'_3^T, \kappa^T) \ge 0$ , тоді напружено-деформований стан розглядається як пружно-пластичний. В останньому випадку алгоритм розрахунків повертає напружено-деформований стан до поверхні текучості, яка може бути записана як  $f(J_1^{P}, J'_2^{P}, J'_3^{P}, \kappa^{P}) = 0$ .

Поверхня міцності на зсув. Така поверхня є актуальною частиною загальної поверхні руйнування для випадку розтягання й слакбообмеженого тиску. Для цього використовується вираз:

$$F_f(J_1) = \alpha - \lambda \exp^{-\beta J_1} + \theta J_1 \tag{2.36}$$

де коефіцієнти *α*, *β*, *θ* визначені шляхом випробування необхідної кількості звичайних циліндричних бетонних зразків.

Масштабувальна функція Рубіна  $\Re$  визначає міцність бетону для будь-якого випадку напружено-деформованого стану відносно даних випробувань для тристороннього стиску (three axial compression (TAC)) за допомогою добутку  $\Re F_{f}$ .

Обмежувальний купол поверхні у разі зміцнення бетону під час ущільнення за умови стискання. Така поверхня має дві частини та описується функцією:

$$F_{c}(J_{1},\kappa) = 1 - \frac{[J_{1} - L(\kappa)][|J_{1} - L(\kappa)| + J_{1} - L(\kappa)]]}{2 [X(\kappa) - L(\kappa)]^{2}}$$
(2.37)

де  $L(\kappa)$  визначається як:

$$L(\kappa) = \begin{cases} \kappa & \text{if } \kappa > \kappa_0 \\ \kappa_0 & \text{otherwise}, \end{cases}$$
(2.38)

Поверхня купола перетинається з віссю в точці  $J_1 = X(\kappa)$ . Це перетинання залежить від коефіцієнта еліптичності *R* як відношення головної й побічної осей. Рух цієї поверхні (розширення або скорочення) базується на правилі зміцнення:

$$\varepsilon_{v}^{p} = W \Big[ 1 - e^{-D_{1}(X - X_{0}) - D_{2}(X - X_{0})^{2}} \Big], \qquad (2.39)$$

де  $\varepsilon_v^p$  – об'ємна пластична деформація;

*W*-максимум об'ємної пластичної деформації;

*D*<sub>1</sub>, *D*<sub>2</sub> – вхідні параметри моделі;

 $X_0$  – початкове положення обмежувального купола поверхні, коли  $\kappa = \kappa_0$ .

<u>Руйнування.</u> Перетворення в'язкопластичного напруження в напруження, що викликає ушкодження, відбувається з використанням формули:

$$\sigma_{ij}^{d} = (1-d)\sigma_{ii}^{vF}, \qquad (2.40)$$

де *d* – скалярний параметр, який перетворює тензор напружень без ушкодження в тензор з ушкодженням.

В'язке руйнування відбувається, коли енергетичний параметр  $\tau_3$  перевищує граничне значення  $\tau_{0c}$ . Цей енергетичний параметр визначається за формулою:

$$\tau_{\rm c} = \sqrt{\frac{1}{2}\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}}, \qquad (2.41)$$

де  $\sigma_{ij}$  – тензор напружень;

*є<sub>іі</sub>* – тензор деформацій.

Крихке руйнування відбувається внаслідок розтягування і у цьому випадку енергетичний параметр  $\tau_t$  перевищує  $\tau_{0t}$ . Цей параметр визначається за формулою:

$$\tau_{\rm t} = \sqrt{E \, \varepsilon \,_{\rm max}^2} \,, \tag{2.42}$$

де Е – модуль пружності матеріалу;

*є<sub>тах</sub>* – максимальне деформаційне напруження.

<u>Функція ослаблення.</u> У міру накопичення дефектів параметр руйнування *d* зростає від мінімально можливого нульового значення до одиниці. Відповідно до типу руйнування функція, що послабляє, визначається як:

- для в'язкого руйнування:

$$d(\tau_t) = \frac{0.999}{D} \left[ \frac{1+D}{1+D e^{-C(\tau_t - \tau_{0t})}} - 1 \right].$$
(2.43)

де *D* – параметр, що характеризує інтенсивність руйнування;

С – експериментально визначений коефіцієнт, що визначає швидкість послаблення;

*т*<sub>t0</sub> − початковий момент часу, від якого відлічується процес руйнування;

- для крихкого руйнування:

$$d(\tau_c) = \frac{d_{\max}}{B} \left[ \frac{1+B}{1+Be^{-A(\tau_c - \tau_{0c})}} - 1 \right],$$
(2.44)

де  $d_{max}$  – максимальне значення пошкодження;

В – параметр, що визначає чутливість матеріалу до крихкого руйнування;

А – коефіцієнт, що враховує швидкість руйнування;

 $\tau_c$  – момент часу, коли починається крихке руйнування;

*т*<sub>0c</sub> – початковий момент відліку руйнування.

Параметр руйнування множить усі шість компонентів тензора напружень і відповідає поточному максимуму для такого типу руйнування: крихкого або в'язкого. Параметри *A*, *B*, *C* та *D* визначаються формою спадаючої області діаграми деформування бетону.

Регулювання чутливості моделі до розрідження сітки. Модель бетону підтримує постійне значення енергії утворення тріщини, з урахуванням розміру СЕ. Значення енергії утворення тріщини визначається як площа під спадаючою гілкою кривої діаграми деформування бетону від максимальної точки до нуля. Це забезпечується за допомогою добору параметрів A та C як залежних величин від ефективної довжини СЕ, яка обчислюється як корінь кубічний від його об'єму, самого значення енергії утворення тріщини  $G_{f_3}$  граничних значень енергетичного параметра ініціації утворення тріщини  $\tau_{0_3}$  або  $\tau_{0_7}$  і параметрів форми кривої ослаблення D або B.

Енергія утворення тріщини в LS-DYNA обчислюється на основі п'яти параметрів, визначених користувачем: енергії утворення тріщини при одноосному розтягу (GFT), чистому зсуві (GFS) і одноосному стиску (GFC), а також показників PWRC і PWRT.

При цьому система автоматично розраховує величину енергії деформації шляхом інтерполяції між трьома значеннями енергії утворення тріщини як функції параметрів напружено-деформованого стану. Для описаних обчислень застосовуються формули:

- за умови розтягу:

$$G_f = \text{GFS} + \left(\frac{-J_1}{\sqrt{3J_2'}}\right)^{\text{PWRT}} [\text{GFT} - \text{GFS}], \qquad (2.45)$$

- за умови стиску:

$$G_f = \text{GFS} + \left(\frac{J_1}{\sqrt{3J_2'}}\right)^{\text{PWRC}} [\text{GFC} - \text{GFS}], \qquad (2.46)$$

де: GFS – початкове значення енергії утворення тріщини;

 $J_1 J_2$ , – інваріанти тензора напружень;

*GFT* – значення енергії утворення тріщини при максимальному розтягувальному стану;

*GFC* – значення енергії утворення тріщини при максимальному стискальному стану.

<u>Руйнування окремих скінченних елементів.</u> Окремий СЕ втрачає свої міцність і жорсткість за умови, коли  $d \rightarrow 0$ . Попереджаючи складності, які можуть виникнути у разі надмірно низької жорсткості, умова руйнування СЕ доступна як користувацька опція. За замовчуванням елемент руйнується за умови, якщо  $d \ge 0,99$  і максимальна головна деформація більше ніж встановлена користувачем введена величина.

<u>Ефект в'язкопластичного деформування під час високих швидкостей</u> <u>деформацій.</u> На кожному тимчасовому кроці інтегрування алгоритм програми для визначення в'язкопластичних напружень між значеннями поточними значеннями тензора пружних деформацій і значень нев'язких пластичних напружень (без врахування швидкості деформацій). При цьому використовується формула:

$$\sigma_{ij}^{vp} = (1 - \gamma)\sigma_{ij}^{T} + \gamma\sigma_{ij}^{p}$$
(2.47)

де:

$$\gamma = \frac{\Delta t/\eta}{1 + \Delta t/\eta},\tag{2.48}$$

де  $\gamma$  – параметр, що визначає вплив пластичних напружень;  $\sigma^{T}_{ij}$  – напруження в межах пружної поведінки;  $\sigma^{P}_{ij}$  – пластичні напруження.

Тут ефективний коефіцієнт піддатливості (залежить від типу напруженого стану й визначається подібно енергії утворення тріщини):

- за умови розтягу

$$\eta = \eta_s + \left(\frac{-J_1}{\sqrt{3J_2'}}\right)^{\text{PWRT}} [\eta_t - \eta_s], \qquad (2.49)$$

- за умови стиску

$$\eta = \eta_s + \left(\frac{J_1}{\sqrt{3J_2'}}\right)^{\text{PWRC}} [\eta_c - \eta_s]$$
(2.50)

тут основні коефіцієнти визначаються за формулами:

$$\eta_s = \text{SRATE} \times \eta_t, \eta_t = \frac{\text{ETA0T}}{\dot{\epsilon}^{\text{NT}}}, \eta_c = \frac{\text{ETA0C}}{\dot{\epsilon}^{\text{NC}}},$$
 (2.51)

де *J*<sub>1</sub>*J*<sub>2</sub>, – інваріанти тензора напружень;

η<sub>t</sub> – ефективний коефіцієнт піддатливості при розтягу;

 $\eta_s$  – значення при чистому зсуві;

 $\eta_{\rm c}-$ ефективний коефіцієнт піддатливості за умови стиску.

Прийняті параметри мають такі позначення: SRATE – відповідний коефіцієнт для напружень зсуву; ETA0T та NT – відповідні параметри для одноосного розтягу; ETA0C та NC – відповідні параметри для одноосного стиску;  $\dot{\epsilon}^{i}$  – ефективна швидкість деформації.

Ця модель в'язкопластичного деформування бетону може бути використана для опису впливу поточної швидкості деформації ( $\dot{\varepsilon} > 100$ ). Граничний ефект врахування швидкості деформації регулюється за допомогою встановлених користувачем параметрів OVERT для розтягування й OVERC для стиску. При цьому виконується умова:

Якщо 
$$E\dot{\epsilon}\eta > OVER$$
, тоді  $\eta = \frac{m}{E\dot{\epsilon}}$ , (2.52)

де m = OVERT при розтяганні, і m = OVERC при стиску, E - модуль Юнга матеріалу.

Для визначення характеру деформування використовуються діаграми деформування, які зображені на рис. 2.8.



Рис. 2.8 Діаграми деформування бетону залежно від класу міцності

Діаграми деформування бетону (рис. 2.8) відображають залежність напружень від деформацій і дозволяють оцінити поведінку матеріалу в різних

### 2.8. Математична модель поведінки арматурної сталі під час механічного навантаження

Згідно з термінологією, прийнятою в документації до програмного комплексу LS-DYNA, математичний опис феноменології поведінки арматурної сталі відповідає моделі матеріалу, що має номенклатурне позначення в системі LS-DYNA як MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL Material type No 004. Ця модель описує простий ізотропний матеріал із діаграмою деформування, що симетрична і для стиску, і для розтягу. Вигляд використовуваної діаграми показаний на рис. 2.9.



Рис. 2.9. Діаграми деформування моделі матеріалу для опису арматурної сталі

При цьому деструкція матеріалу відбувається у випадку досягнення граничної деформації, встановлюваної користувачем.

# **2.9.** Технічне описання і вихідні дані фрагмента горизонтальної огороджувальної конструкції для дослідження її поведінки під час пожежі

Дослідження напружено-деформованого стану горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій в умовах впливу пожежі проведено в тому числі на основі залізобетонних порожнистих плит. Оскільки завдяки їх оригінальним конструктивним особливостям такі плити поєднують у собі високу міцність і легкість, це робить їх затребуваними в сучасному будівництві. Порожнисті плити забезпечують ефективність матеріалу, знижують навантаження на несучі конструкції та мають високі теплоізоляційні властивості. Крім того, такі конструкції є статично визначеними, що може знижувати їхню надійність в умовах впливу пожежі порівняно зі статично невизначеними конструкціями. Це підкреслює необхідність проведення досліджень саме лля таких типів конструкцій. Отже, проведення досліджень з оцінювання вогнестійкості таких конструкцій є необхідним, оскільки використання порожнистих плит із гарантованим класом вогнестійкості з огляду на збереження цілісноті протягом нормованого часу впливу пожежі є важливою умовою для запобігання поширенню небезпечних чинників пожежі у будівлях у вертикальному напрямку.

### 2.9.1. Конструктивна схема плити перекриття та її фрагмента для створення розрахункової області

На рис. 2.10 зображена конструктивна схема залізобетонної порожнистої плити перекриття для дослідження поведінки під час пожежі.



Рис. 2.10 Залізобетонна порожниста плита перекриття для дослідження: *a* – зовнішній вигляд; *б* – конструктивна схема (*б*) залізобетонної порожнистої плити перекриття для дослідження
З метою отримання осяжного з точки зору тривалості та складності обчислювального процесу розрахункова область відповідає фрагменту залізобетонної порожнистої плити, за отриманими даними для якого можна було б вивчати поведінку всієї плити.

Періодичний характер конструкції плити дозволяє розглянути характерний її паттерн. У такому разі це фрагмент плити між порожнинами. Такий підхід є досить поширеним і добре описаний у роботах [203, 204, 241, 246].

Конструктивна схема фрагмента залізобетонної порожнистої плити для вивчення її поведінки під час нагрівання в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою математичного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів за явним підходом до інтегрування рівнянь механіки деформованого тіла представлена на рис. 2.11 [246].



Рис. 2.11. Конструктивна схема фрагменту залізобетонної порожнистої плити для дослідження її поведінки при нагріванні в умовах впливу пожежі

На конструктивній схемі (рис. 2.11) представлені основні компоненти досліджуваної залізобетонної порожнистої плити.

## 2.9.2. Характеристики матеріалів конструкції

Технічні дані, які необхідні для моделі матеріалу бетону наведені в табл.

2.1., де зазначені основні характеристики для моделі матеріалу бетону CSCM type No 159, інші параметри, описані в п. 2.7, приймаються за замовчуванням [246].

Таблиця 2.1

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
1 1		
Густина	кг/м <sup>3</sup>	2400
5		
Границя міцності	МПа	30
Розмір крупного заповнювача	Μ	0.02

Параметри моделі бетону CSCM type No 159

Технічні дані, які необхідні для моделі матеріалу арматурної сталі наведені в табл. 2.2., де зазначені основні характеристики для моделі матеріалу арматурної сталі MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL type No 004, інші параметри, описані в п. 2.8, приймаються за замовчуванням [246].

Таблиця 2.2

Параметри моделі MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL type No 004

Арматура	Коэфф.	Модуль	Межа	Густина,	Гранична
	Пуассона	пружності,	текучості,	кг/м <sup>3</sup>	деформація
		ГПа	МПа		
Основна	0.3	210	500	7850	0.15
Додаткова	0.5	210	240	1030	0.15

Матеріал для опор балки приймається абсолютно твердим матеріалом (MAT RIGID type № 020). Для встановлення геометричної незмінюваності системи цей MAT RIGID type № 020 матеріал для опорної поверхні не допускає деформування і для нього опціонально блоковані всі ступені вільності.

На рис. 2.12 показана схема елементів зразків й відповідних їм моделей матеріалів [246].

Застосування матеріалу МАТ RIGID type № 020 гарантує



Рис. 2.12. Схема прикладення моделей матеріалів до елементів зразків: а – бетону; б – арматури та опори

відсутність деформацій опорної поверхні, забезпечуючи необхідні умови закріплення балки відповідно до прийнятої схеми моделювання.

## 2.9.3. Механічне навантаження та граничні умови

На рис. 2.13 проілюстрована схема фрагмента плити із прикладеним розподіленим навантаженням до її верхньої поверхні [246].



Рис. 2.13. Механічна схема фрагмента залізобетонної плити: *a* – схема навантаження; б - схема опирання конструкції

На рис. 2.13 на наведеній схемі плити показані нерухомі опорні поверхні, які є абсолютно твердими тілами, що обумовлено прийнятим матеріалом (рис. 2.12б). При цьому в опціях цього матеріалу визначено, що рух цих опорних поверхонь у вигляді фрагментів стін або опорних балок заблокований для всіх переміщень. Спирання плити на такі опори здійснено шляхом моделювання контактної взаємодії між окремими частинами моделі, автоматично створеними в системі як частини з різного матеріалу. Контактна взаємодія встановлена автоматична типу «поверхня-поверхня» з урахуванням тертя між ними за узагальненим законом Кулона з коефіцієнтом тертя  $\mu = 0.6$  (тертя між сталевою поверхнею та поверхнею бетону).

Для об'єднання переміщень частин моделі, відповідних до бетону й арматурного каркасу, використовується опція CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID. Дана опція визначає, що алгоритм системи шукає перетинання лінійних або плоских СЕ з об'ємними СЕ й шляхом інтерполяції визначає спільні точки, що належать обом СЕ пари, й поєднує їхні переміщення. Такий алгоритм заснований на способі множників Лагранжа.

На рис. 2.14 показаний графік збільшення величини діючого розподіленого навантаження, яке діє у залежно від умовного часу.



Рис. 2.14. Графік збільшення навантаження залежно від часу діючого розподіленого навантаження

З графіка (рис. 2.14) видно, як змінюється навантаження протягом усього періоду його дії.

# 2.9.4. Скінченно-елементна схема моделі

Обираючи СЕ для моделі плити, були обрані такі основні положення.

1. Для моделювання бетону й абсолютно твердих опор використовано 8вузловий гексаедричний СЕ, для моделювання сталевої арматури 2- вузловий стрижневий СЕ. Всі СЕ є елементами лагранжевого типу, які представлені на рис. 2.15.

2. Всі типи СЕ є фізично нелінійними, їхні властивості відповідають моделям матеріалів, описаних у п. 2.7 та п. 2.8 цього розділу.



Рис. 2.15. Форма скінченних елементів: *а* – гексаедричний СЕ (SOLID), що моделює бетон; *б* – балковий СЕ (BEAM), що моделює арматурні стержні

На рис. 2.16 показаний загальний вигляд скінченно-елементної схеми фрагмента залізобетонної плити, що є відповідно розрахунковою областю [246].



Рис. 2.16. Скінченно-елементна схема фрагмента залізобетонної плити із опорними поверхнями

Як видно на скінченно-елементній схемі, зображеній на рис. 2.16, сітка СЕ бетону й арматурного каркаса має дуже маленьке розрідження, розміри та кількість СЕ наведені у табл. 2.3.

## Таблиця 2.3

Частина моделі	Мін. розмір, мм	Макс. розмір, мм	Кількість
Бетонна основа	6	84	61202
Арматура	14	25	195
Опори	50	250	2
Загальна кіль	61299		

Параметри скінченних елементів моделей зразків для випробування

Параметри, які визначають густоту сітки, обрані для забезпечення високої точності відображення тріщин і дефектів.

# 2.9.5. Математична модель для визначення теплового навантаження на фрагмент конструкції

Для моделювання теплового впливу у вигляді температурного навантаження на фрагмент залізобетонної плити вирішувалася Теплотехнічна задача. Для розв'язання теплотехнічної задачі були сформульовані такі основні положення та припущення [36, 118, 221 – 225].

1. Розрахунок проведено для фрагмента залізобетонної плити у вигляді однієї секції із порожниною [246].

2. Для розв'язання теплотехнічної задачі застосовується квазілінійне нестаціонарне диференціальне рівняння теплопровідності у вигляді (1.12) з постановкою крайової задачі з використанням граничних умов (ГУ) ІІІ роду з врахуванням променистого та конвекційного теплообміну обігрівних поверхонь із середовищем у приміщенні з пожежею.

3. Температурний режим у приміщені із пожежею обчислюється за стандартним температурним режимом пожежі з використанням формули (1.4).

4. Зважаючи на велику різницю між теплопровідністю арматурної сталі і теплопровідністю бетону, поширення тепла враховується тільки у бетоні.

5. Теплофізичні характеристики (ТФХ) бетону відповідають температурним залежностям, які рекомендовано Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2005 [15].

6. Нестаціонарне диференціальне рівняння теплопровідності апроксимується за допомогою методу скінченних елементів із застуванням комп'ютерної системи ANSYS APDL.

Для постановки крайової задачі теплопровідності були застосовані ГУ III роду [247–254]:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial r} = \alpha(\theta_P - \theta_W), \qquad (2.53)$$

де  $\theta_P$  – температура у просторі приміщення із пожежею;

 $\theta_W$  – температура обігрівної поверхні фрагмента плити,

 $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну.

Коефіцієнт теплообміну обчислюється із врахуванням конвекції та теплового випромінювання. Для обчислення коефіцієнта теплообміну застосований спрощений підхід, рекомендований [15, 36], згідно із яким для цього має використовуватися формула:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_\kappa, \tag{2.54}$$

де  $\alpha_P$  – коефіцієнт променистого теплообміну.

Рекомендації норм [15] передбачають визначення конвективної та променистої складових проводити із використанням виразів:

. . . .

 $\alpha_{K} = 25 \text{ Bt/(m}^{2} \cdot \text{K}) - для поверхні, що обігрівається;}$   $\alpha = 9 \text{ Bt/(m}^{2} \cdot \text{K}) - для поверхні, що не обігрівається;}$ (2.55)

$$lpha_{_P} = arepsilon \cdot rac{T_{_W}^4 - T_{_P}^4}{T_{_W} - T_{_P}},$$

де  $\varepsilon_c = 0.7 -$ ступінь чорноти поверхні бетону [15];  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К) – стала Стефана-Больцмана.

Для розвязання теплотехнічної задачі щодо теплового впливу пожежі на залізобетонну плиту були використані теплофізичні характеристики бетону рекомендовані другою частиною Eurocode 2 [15] у в игляді температурних залежностей коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності з використанням формул, поданих у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Коефіцієнт теплопровідності, λ(θ), Вт/(м·°С) Важкий бетон на сил	Коефіцієнт       Об'ємна питома теплоємність,         теплопровідності, $\lambda(\theta)$ ,       Об'ємна питома теплоємність, $BT/(M \cdot {}^{\circ}C)$ Ср( $\theta$ )· $\rho$ , Дж/( $M^{3} \cdot {}^{\circ}C$ )         Важкий бетон на силікатному заповнювачі EN 1994-1-2:201	
$2 - 0,2451 \frac{\theta}{100} + 0,0107 \left(\frac{\theta}{100}\right)^2$	900 <i>р</i> · при 20 °С ≤ <i>θ</i> ≤ 100 °С, (900+( <i>θ</i> - 100)) <i>р</i> при 100 °С< <i>θ</i> ≤ 200°С, (1000+0,5( <i>θ</i> -100)) <i>р</i> при 200 °С< <i>θ</i> ≤400°С, 1100 <i>р</i> при 400°С < <i>θ</i> ≤1200 °С	2300

Теплофізичні характеристики бетону залізобетонної плити

Графіки залежностей теплофізичних характеристик бетону від температури подані на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Теплофізичні характеристики бетону: *а* – коефіцієнт теплопровідності; *б* – питома теплоємність

Величини параметрів граничних умов подані у табл. 2.5. Ці показники визначалися згідно із рекомендаціями другої частини Eurocode 1 та другої частини Eurocode 2 [15].

Таблиця 2.5

Параметр	Позн.	Од.вим.	Вел.	Посилання
Обігрівна сторона		I	L	
Конвективна складова коефіцієнта теплообміну	α <sub>c</sub>	Вт/(м <sup>2</sup> °С)	25	EN 1991-1-2 Eurocode 1
Ступінь чорноти	ε		0,7	EN 1992-1-2 Eurocode 2
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	α	Вт/(м <sup>2</sup> °С)	9	EN 1991-1-2 Eurocode 2

Параметри граничних умов для залізобетонної плити

Апроксимація нестаціонарного диференціального рівняння теплопровідності за МСЕ відбувається з використанням виразу [242, 244]:

$$[C_e] \{\theta_e\} + [K_e] \{\theta_e\} = \{Q_e\},$$
(2.56)

в цьому випадку компоненти апроксимаційного рівняння визначаються за формулами, поданими нижче.

Матриця теплоємності СЕ:  $[C_e] = \rho \cdot C_p \int_V \{N\} dV.$ 

Матриця теплопровідності CE:  $[K_e] = \int_{V} [B]^T [D] [B] dV.$ 

Матриця інтерполяції температури в межах  $K_e$ : [B] = {L}{N} $\theta$ . Усереднена температура у межах CE:  $\theta_e = {N}^T {\theta_e}$ . Вектор значень температури у вузлах CE {T<sub>e</sub>}.

Матриця коефіцієнтів теплопровідності:  $[D] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$ .

Векторний диференціальний оператор: {L} =  $\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^{\mathrm{T}}$ .

Матриця теплового потоку на границях CE  $\{Q_e\} = q_W \int_{s} \{N\} ds$ .

Векторний інтерполяційний оператор в області, обмеженої СЕ: {N}.

Система нелінійних рівнянь для апроксимації нестаціонарного диференціального рівняння теплопровідності у матричній формі має вигляд:

$$[K]\{\theta\} = \{Q_e\}, \tag{2.57}$$

де [K] – матриця еквівалентної теплопровідності, залежна від об'ємної теплоємності та коефіцієнта теплопровідності бетону.

В узагальненому вигляді матричне рівняння (2.57) можна записати:

$$\{\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta})\} = \{\mathbf{Q}_{\mathrm{e}}\},\tag{2.58}$$

де  $\{P(\theta)\}$  – вектор внутрішніх теплових потоків у вузлах CE, зумовлених густиною теплових потоків.

Отримана система нелінійних рівнянь розв'язується за допомогою ітерацій за методом Ньютона - Рафсона [242, 244].

Якщо застосувати такий метод, то нев'язність має прямувати до мінімуму відповідно до виразу:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q_e\} - \{P(\theta)\} \longrightarrow \{0\}.$$

$$(2.59)$$

Система рівнянь (2.57) лінеаризується за допомогою такого підходу, вона може бути записана у вигляді:

$$\left[K_{T}^{(i-1)}\right]\!\!\left\{\!\Delta\theta_{e}^{(i)}\right\}\!=\!\left\{\!Q^{(i)}\right\}\!-\!\left\{\!P^{(i)}\right\}\!.$$
(2.60)

У такому разі мають виконуватися рівноважні ітерації (і = 1, 2, 3, …), і як результат обчислюються нові величини температур на поточній ітерації за формулою:

$$\left\{\boldsymbol{\theta}^{(i)}\right\} = \left\{\boldsymbol{\theta}^{(i-1)}\right\} + \left\{\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{\theta}^{(i)}\right\}.$$
(2.61)

Ітераційний процес триває до досягнення заданої збіжності.

У формулі (2.61) члени дотичної матриці [K<sub>T</sub>] обчислюються за формулою:

$$\left[\mathbf{K}_{\mathrm{T}}^{(i-1)}\right] = \left(\frac{d\{\Phi\}}{d\{\theta\}}\right)_{i-1}.$$
(2.62)

Вектор {Ф} записується через усічений ряд Тейлора і має такий вигляд:

$$\left\{ \Phi^{(i)} \right\} \cong \left\{ \Phi^{(i-1)} \right\} + \left[ \mathbf{K}_{\mathrm{T}}^{(i-1)} \right] \left\{ \Delta \theta^{(i)} \right\}, \tag{2.63}$$

де  $\{\Delta \theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i)}\} - \{\theta^{(i-1)}\}$  – вектор зміни температури для виконання подальшої ітерації.

У виразі (2.60) { $Q^{(i)}$ } – вектор теплових потоків у вузлах СЕ, який обчислюється після отримання значень вектора зовнішніх заданих теплових потоків { $Q_{0n}$ } та матриці еквівалентної теплопровідності [K]; { $\overline{P}$ } – еквівалентний вектор внутрішніх теплових потоків у вузлах СЕ, що отримується після обчислення матриці еквівалентної теплопровідності, яка отримуються шляхом чисельного інтегрування за часом вектора зміни температур { $\Delta \theta^{(i)}$ } за методом Ейлера із застосуванням формули:

$$\left\{ \Theta_{n+1} \right\} - \left\{ \Theta_n \right\} = \Delta t_n \left( 1 - \varsigma \right) \left\{ \dot{\Theta}_n \right\} + \Delta t_n \varsigma \left\{ \dot{\Theta}_{n+1} \right\}, \qquad (2.64)$$

де  $\Delta t_n$  – часовий крок інтегрування;

*ζ* – число Ейлера, дорівнює 0,5, якщо реалізувати неявну схему обчислень

 Кранка–Ніколсона.

Матриця еквівалентної теплопровідності [К] обчислюється за формулою:

$$[\mathbf{K}] = \frac{1}{\varsigma \Delta t_n} [\mathbf{C}_e] + [\mathbf{K}_e], \qquad (2.65)$$

де [C<sub>e</sub>] – матриця теплоємності елемента.

[К<sub>e</sub>] – матриця теплопровідності елемента.

 $\xi$  – числовий коефіцієнт, можливо, пов'язаний зі схемою числового інтегрування.  $\Delta t_n$  – крок за часом у чисельному моделюванні.

Для визначення  $\{Q(\theta)\}$  застосовується формула:

$$\{\mathbf{Q}_{n}(\boldsymbol{\theta})\} = \{\mathbf{Q}_{e}\} + \frac{1-\varsigma}{\varsigma} [\mathbf{C}_{e}] \{\![\dot{\boldsymbol{\theta}}]_{n}\} - [\mathbf{K}_{e}]\!\{\!\boldsymbol{\theta}_{n}\}, \qquad (2.66)$$

де  $\{Q_e\}$  – початковий (або зовнішній) вектор теплових навантажень;

[С<sub>e</sub>] – матриця теплоємності елемента;

 $\{ [\dot{\theta}]n \}$  – вектор похідних температур за часом у момент *n*;

[К<sub>e</sub>] – матриця теплопровідності;

 $\{\theta_n\}$  – вектор температур у момент *n*;

 $\xi$  – параметр чисельного методу, що відповідає схемі часової дискретизації.

Для проведення розрахунку використана розрахункова схема теплового впливу пожежі, що подана на рис. 2.18.



Рис. 2.18. Схема теплового впливу пожежі на фрагмент залізобетонної порожнистої плити

Скінченно-елементна схема фрагмента залізобетонної плити у відповідності з рис. 2.18 зображена на рис. 2.19.



Рис. 2.19. Скінченно-елементна схема фрагмента залізобетонної плити

До скінченно-елементної схеми згідно із схемою на рис. 2.18 було прикладено ГУ, схема розташування яких подана на рис. 2.20.



Рис. 2.20. Схема розташування граничних умов на скінченно-елементній схемі залізобетонної плити

Після проведення розрахунків було отримано результати у вигляді температурних розподілень, що зображені на рис. 2.21 [246].



Рис. 2.21. Температурні розподілення у фрагменті залізобетонної порожнистої плити у різні моменти часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі (К): *a* – 30 хв; *б* – 60 хв; *в* – 90 хв; *г* – 120 хв

За результатами теплового розрахунку було сформовано температурне навантаження, що прикладалося до шарів бетону перерізу фрагмента залізобетонної плити згідно з рис. 2.16 та арматурних стержнів, при цьому використовувалося середнє значення температури, яке визначалося для кожного із шарів та арматурних стержнів. Схема прикладання температурного навантаження наведена на рис. 2.22.



Рис. 2.22. Температурні розподілення у фрагменті залізобетонної порожнистої плити у різні моменти часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі (К): *а* – температурні криві прогріву різних внутрішніх шарів плити; *б* – внутрішні шари плити, що відповідають прогріванню за температурними кривими

Таким чином було прикладено температурне навантаження в процесі розв'язання теплотехнічної задачі (рис. 2.22) для подальшого розв'язання статичної задачі.

## 2.10. Обговорення результатів розрахунку

У контексті поставлених завдань у цій роботі основна увага була приділена вивченню умов деформування фрагментів залізобетонних плит у порівнянні їх із результатами випробувань таких залізобетонних плит. Тому можливість утворення тріщин опціонально була знижена (в моделі бетону CSCM type № 159 опція ERODE встановлена 0.0). Це дозволяє прослідкувати розподіли розрахункових даних у зразку за умови зберігання ним відповідної цілісності, крім того уникнути негативного впливу тріщин із непропорціональним масштабом у межах комірок сіткових моделей. На рис. 2.23 показано розподілення нормальних напружень у напрямку поздовжньої осі фрагмента залізобетонної плити за різних рівнів навантаження.



Рис. 2.23. Розподілення нормальних напружень у направленні поздовжньої осі фрагмента залізобетонної плити за різних рівнів навантаження: *a* – при прикладенні власної ваги; *б* – при прикладенні діючого навантаження; *в* – момент, коли температурне навантаження призводить до деструкції фрагмента

Якісно дані зображення показують наявність найбільшої величини нормальних напружень усередині фрагмента, що свідчить про правдивість результатів моделювання [246]. На рис. 2.24 показаний графік максимального прогину фрагмента залізобетонної плити під впливом прикладених навантажень та через вплив температури [246].



Рис. 2.24. Графік максимального прогину фрагмента залізобетонної плити під впливом температури залежно від часу експонування

Наведена картина руйнування фрагмента залізобетонної плити збігається із теоретичними уявленнями про цей процес для подібних плит. Можна помітити, що процес руйнування полягає у розширенні бетонного зразка у його середині. Межа вогнестійкості залізобетонної плити за настанням граничного стану втрати несучої здатності відбувається у час 52,4 хв впливу стандартного температурного режиму пожежі.

На рис. 2.25 наведений розподіл еквівалентних пластичних деформацій усередині фрагмента залізобетонної плити. Пластичні деформації локалізуються усередині та по краях фрагмента із характерною Y-подібною формою всередині плити. Це свідчить про те, що зразок руйнується з причини зсувних деформацій із характерною ділянкою, що згідно із роботами [225, 245, 246] називається призмою руйнування.

Отриманий результат є важливим з огляду на вивчення механізму утворення наскрізних тріщин під впливом високотемпературного нагрівання під час пожежі. Важливим є також факт, що поява такої наскрізної тріщини відбувається за

певний проміжок часу до настання граничного стану втрати несучої здатності [246].



Рис. 2.25. Розподіл ефективних пластичних деформацій у фрагменті залізобетонної плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: *a* – на 45 хв; *б* – на 52,4 хв

Розподіл ефективних пластичних деформацій у фрагменті залізобетонної плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі (рис. 2.25) вказує на утворення тріщин в місцях найбільших значень пластичних деформацій.

### 2.11. Висновки до розділу

З використанням результатів виконаних досліджень була проаналізована задача розробки математичних моделей для прогнозування та відтворення розвитку наскрізних тріщин та дефектів у горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкціях, пов'язаних із їхньою здатністю зберігати цілісність в умовах впливу пожежі. В процесі досліджень було одержано такі основні результати:

 розроблена методика математичного моделювання поведінки залізобетонних плит в умовах вливу пожежі із прогнозуванням розвитку тріщин із набуттям наскрізного характеру;

• розроблена методика ґрунтується на застосуванні явного методу інтегрування рівнянь динаміки та рівнянь напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій за їхньою апроксимацією методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу LS-DYNA.

• з використанням розробленої методики було проведено математичне моделювання поведінки фрагмента залізобетонної порожнистої плити в умовах впливу пожежі і показано, що отримані результати відповідають даним щодо реальної поведінки залізобетонних плит у таких умовах;

• виявлено, що межа вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності настає на 52,4 хв впливу пожежі проте розрахунки показують, що розвиток наскрізних тріщин може наступити й раніше;

• показано, що запропоновані математичні моделі є ефективним засобом для дослідження характеру тріщин у залізобетонних плитах під час впливу стандартного температурного режиму пожежі.

# РОЗДІЛ З РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ

3.1. Описання методик, матеріалів, засобів та обладнання експериментальних досліджень

3.1.1. Експериментальні засоби та обладнання для проведення досліджень

Для випробувань використано вогневу піч ГП-3 (атестат № 24-2/4379, чинний до жовтня 2021 року), приміщення для кондиціювання зразків ПКЗ-2 (атестат № 24-2/0442, чинний до лютого 2023 року) і засоби вимірювальної техніки, описані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

№	Найменування засобів та	Вироб.	Межі діапазону	Вимірювальна
з/п	обладнання	номер	вимірювання	похибка
1	Лінійка для вимірювань	-	від 0 до 1000 мм	±1 мм
2	Секундомір СОСпр-2б-2- 010.	3187	від 0 до 60 хв,	0,1 c
3	Контрольна цифрова система «СКОРАД» із блоками Вега-5.	-	від -5 до 1300°С	± 1,5 °C
4	Термопари ТХА, 6 шт.	-	від -50 до 450 °С	Клас 2
5	Термопари N, 8 шт.	-	від 0 до 1200 °С	Клас 2
6	Шафа сушильна	-	від 20 до 100 °С	±2,5 °C
7	Щупи:Ø 6 мм, Ø 25 мм	Б/н	6 мм, 25 мм	± 0,1 мм

# Засоби вимірювальної техніки

Продовження таблиці 3.1

			1 / 1	1
8	Електронні ваги ULTRA	021	від 0 до 200 г	± 0,1 Γ
9	Штангенциркуль ЩЦ-2а	0711110	від 0 до 300 мм	± 0,05 мм
10	Цифровий вакуумметр	20	від 0 до	+0.5%
	ММЦ-200		+200 Па	_ 0,0 /0
11	Термогігрометр	1045	від 25 до 90 %	± 5 %
	APT-06917		від 0 до 50 °С	± 1,0 °C
12	Ваги кранові електронні	1504	від 10 кг до	Клас точності –
	OCS-M-lt		1000 кг	середній
13	Віддалемір лазерний	902830	від 0,05 до 100 м	±1 мм
	ручний Disto D3a BT	600		

На рис. 3.1 зображена схема випробувальної установки, яка складається з вогневої печі, навантажувальної, вимірювальної та теплоізоляційної систем, а також її загальний вигляд.



Рис. 3.1. Схема установки для дослідження поведінки залізобетонних плит під час пожежі



Рис. 3.2. Зовнішній вигляд вогневої установки для випробувань зразків залізобетонних порожнистих плит

Для імітації діючого навантаження на зразки залізобетонних плит використовуються калібрувальні залізобетонні блоки, які встановлено на необігрівну поверхню зразків залізобетонних плит. Загальна маса залізобетонних блоків, які імітують діюче навантаження, розрахована так, щоб вони у сукупності формували тиск, відповідний діючому розподіленому навантаженню  $0,5Q_{\text{max}}$ . Сумарно отримується тиск, що становить  $Q_{E,d} = 3,92$  кПа. На рис. 3.3 наведений зовнішній вигляд та конструктивна схема калібрувального залізобетонного блоку.



Рис. 3.3. Конструктивна схема калібрувального залізобетонного блока для імітації діючого навантаження на залізобетонні плити

Для формування механічного навантаження використовуються два типи залізобетонних блоків, що мають різну висоту: 580 мм та 290 мм. Залізобетонні блоки із меншою висотою встановлюються по краях зразків залізобетонних плит для попередження їхнього передчасного руйнування під час розвитку тріщин, що спричиняються деформаціями зсуву. Всього застосовується для навантаження на один зразок залізобетонної плити 4 залізобетонних блоків із висотою 580 мм та 2 залізобетонні блоки висотою 290 мм.

Нагрівальна система вогневої установки заснована на використанні рідкого палива (дизель) і керується за допомогою автоматичної системи керування. Дизель спалюється у факелах, що формуються у нагрівальних каналах (рис. 3.1), де паливо змішується із повітрям за допомогою вентиляторів, що його нагнітають. Рідке паливо у нагрівальні канали подається у вигляді розпиленої фази за допомогою форсунок. Потужність пальникової системи регулюється співвідношенням між обсягами палива та повітря у нагрівальних каналах.

На рис. 3.4 показана система для контролю температури у вогневій камері печі установки та термовимірювальними засобами, що встановлені безпосередньо у зразках залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням. Ця система складається з комутаційних шляхів, що поєднують вимірювальні пристрої із електронними засобами керування.

Контроль температури у вогневій камері печі установки та у зразках залізобетонних плит, підданих випробуванням, відбувається за допомогою термопар, тип і номенклатура яких наведена у табл. 3.1. Термопари для контролю температури всередині вогневої камери печі підібрані таким чином, щоб було можливо виміряти температуру у тих діапазонах, які притаманні температурним режимам випробувань (до 1 200 °C).

На рис. 3.5 показаний типовий вигляд термопари для контролю температури у вогневій камері печі установки печі, а також її конструкція. Термопара має вимірювальний спай типу «хромель-алюмель», який поміщений у захисну оболонку.



Рис. 3.4. Комутаційна система контролю температур у вогневій камері печі установки та у зразках залізобетонних плит, які випробовують

Конструкція термопари дозволяє переміщувати термопару для вибору контрольної точки всередині вогневої камери печі.



Рис. 3.5. Термопара для контролю температури у вогневій камері печі установки для випробувань: *a* – зовнішній вигляд; *б* – конструктивна схема: *l* – термозахисна оболонка; *2* – захисний корпус; *3* – вимірювальний спай Для фіксації показників термопар та забезпечення роботи системи автоматичного регулювання тепловим режимом випробування застосовується спеціально розроблене для цієї мети програмне забезпечення. Це програмне забезпечення здійснює збір даних, які отримуються у результаті вимірювань температури та деформацій зразків залізобетонних плит під час випробувань. За допомогою такого програмного забезпечення дані збираються у відповідні таблиці, а на їхній основі будуються необхідні графіки. Також обробка отриманих даних вимірювань дозволяє здійснювати управління паливно-форсунковою системою у автоматичному режимі, цим забезпечено дотримання необхідного температурного режиму для випробувань у вогневій камері печі установки.

На рис 3.6 зображено інтерфейс програмного забезпечення щодо обробки даних та керування подачі палива до форсункової системи. Цей інтерфейс має вікна для візуалізації даних, що фіксуються, а також вікна, де відображаються поточні характеристики пальників.



Рис. 3.6. Інтерфейс програмного забезпечення системи, що здійснює контроль показників вимірювання та керування паливно-форсунковою системою

Для вимірювання температури на поверхнях та всередині зразків порожнистих залізобетонних плит використовувалися дротові термопари типу ТХА (хромель-алюмелєві). Такі термопари мають гнучкий тип виконання теплового захисту за допомогою керамічних намистинок. На рис. 3.7 показаний загальний вигляд та конструктивна схема вимірювальних термопар, призначених для контролю температур у зразках, які піддаються випробуванням. Ці термопари також під'єднуються до комутаційної системи, і є частиною всього вимірювального комплексу, який керується з персонального комп'ютера за допомою відповідного програмного забезпечення.

Вся термоконтрольна арматура, встановлена у вогневій камері печі та у зразках залізобетонних плит для випробування, пройшла відповідну повірку та атестацію, а також має заводські номери та паспорти.





Рис. 3.7. Термопара для вимірювання температури в зразках залізобетонних плит, які піддаються випробуванням: *а* – зовнішній вигляд; *б* – конструктивна схема: *1* – теплозахисна оболонка; *2* – дріт з вогнетривкою ізоляцією; *3* – вимірювальний спай

На рис. 3.8 наведена схема розташування контрольних точок у просторі вогневої камери печі установки для випробувань, де встановлюються термопари в процесі експериментів щодо вивчення поведінки залізобетонних порожнистих плит під час високотемпературного нагрівання в умовах пожежі.



Рис. 3.8. Схема розташування термопар для температурних вимірювань у вогневій камері печі установки для випробувань:  $T_I - T_8$  – термопари; *1* – розташування каналу для відведення димових газів; 2 – пальники, 3 – вісь симетрії

# 3.1.2. Методика виготовлення зразків конструкцій для вогневих випробувань

У попередньому розділі наведені дані щодо математичного моделювання поведінки залізобетонних плит під час високотемпературного нагрівання в умовах пожежі. Метою проведення експерименту є перевірка адекватності отриманих розрахункових даних. Для досягнення поставленої мети мають бути досліджені зразки залізобетонних плит із параметрами, які відповідають найбільш поширеним конструкціям плит такого типу.

Для дослідження адекватності результатів математичного моделювання із застосуванням моделей, описаних у попередньому розділі, було досліджено два однакових зразки залізобетонної плити. У табл. 3.2 наведено основні конструктивні дані та технічне описання зразків порожнистої залізобетонної плити такого типу.

Конструкція залізобетонної порожнистої плити перекриття є типовою. Плита має габаритні розміри 220 мм × 1190 мм × 4500 мм. Залізобетонна плита перекриття виготовлена з бетону класу БСГ С30/35 Р4 F200 W6 M5 та арматури діаметрами 5 мм і 16 мм. Зовнішній вигляд конструкції для випробування, схема

# Таблиця 3.2

Зразок Матеріал зразка	Конструктивні дані
Важкий бетон на силікатному крупному І заповнювачі (клас і міцності С 30/35) м Гарячекатана ребриста м сталева арматура класу з міцності А500С п круглого перерізу – п основна ( Гарячекатана ребриста н сталева арматура класу п основна ( Сарячекатана ребриста н	Несучі збірні залізобетонні каркаси із колонами з високим рівнем механічного навантаження, які мають призначення для забезпечення несучої функції для покриттів та перекриттів 2–3 поверхових будівель. Також можуть бути застосовані для залізобетонних каркасів складських, виробничих приміщень з високим рівнем пожежного навантаження

Технічні характеристики зразків залізобетонних плит для випробувань

основної робочої арматури зразків залізобетонної плити, а також розташування додаткових арматурних каркасів показано на рис. 2.10.

У табл. 3.3 наведені дані щодо основних параметрів зразків залізобетонних плит. Відповідно до основних положень програми проведення експерименту зразки залізобетонної плити мають бути виготовлені з бетону класу C30/35 (B30).

Геометричні параметри, параметри робочої та додаткової арматури, її клас міцності та клас міцності і склад бетону вибрані для найбільш поширених конструкцій залізобетонних порожнистих плит відповідно до серії 1.141.1. Виготовлення зразків залізобетонних порожнистих плит для дослідження виконувалося із дотриманням всіх основних технологічних процедур.

# Таблиця 3.3

<u> </u>	· ~	•	~
Основні паг	аметри запізобетонні	их ппит-зразків ппя	випробувань
	umerph sumsooeronnin	IN IIIIII SPUSKID HIM	Dhipooybailb

Параметр	Познанения	Велицииз	Одиниця
Параметр	Позначення	Беличина	виміру
Геометричні розміри плити:			
ширина перерізу,	S	1,19	
висота перерізу,	h	0,22	
відстань до осі арматури,	w	0,018	М
довжина	l	4,5	
Тип бетону	Важкий на силікатному заповнювачі	Клас міцності С 30/35 (В30)	ΜΠа
Густина бетону	$\rho_{C}$	2400	кг/м <sup>3</sup>
Водоцементне відношення	В/Ц	0,36	
Найбільша середня вологість	и	< 3	%
Робоча арматура нижня:			
діаметр,	$d_1$	0,016	М
клас міцності		A500C	
Додаткова арматура верхня:			
діаметр,			
клас міцності	$d_2$	0,005	М
		A240C	
Каркасна арматура:			
діаметр,	$d_3$	0,005	М
клас міцності		A240C	

Для формування залізобетонної порожнистої плити був застосований звичайний важкий бетон, склад суміші якого наведений у табл. 3.4.

174

Склад бетонної суміші для зразків залізобетонних плит, які піддаються випробуванням

Компонент бетонної суміші	Маса компонента	Найбільше
	пропорціонально на 1 м <sup>3</sup> ,	відхилення, кг
	КГ	
Портландцемент марки «400»	460	
Пісок кварцовий річкової	660	10
Щебінь гранітний	1 150	10
Вода водопровідна	165	

За основними параметрами бетон зразків залізобетонних плит для випробування відповідає важкому бетону на силікатному крупному заповнювачі. Такий тип бетону є найпоширенішим для виготовлення подібних елементів залізобетонних конструкцій будівель [29, 36], а також зразків елементів конструкцій і фрагментів елементів залізобетонних конструкцій для їхніх вогневих випробувань, що описано у роботах [29, 36, 226].

Виготовлення зразків залізобетонних плит для вогневих випробувань, проводилося із використанням типової технології заводів, що є виробниками залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій. При виготовленні зразків залізобетонних плит для вогневих випробувань були зроблені глухі отвори для розташування в них термопар відповідно до схеми, що була прийнята для вивчення показників температур у їхніх перерізах. Після завершення заповнення опалубних форм, бетон зразків піддавався ущільненню з використанням вібростендів. Тверднення та висушування зразків залізобетонної плити відбувалося на повітрі продовж 28 діб, їх було розташовано в кондиційованому приміщенні за звичайних кліматичних умов за температури 20°±2°С, вологості 55±2 % та звичайному атмосферному тиску 101 кПа. На початковому етапі перед випробуванням було перевірено зразки залізобетонної плити, чи відповідають вони технічній документації.

Для перевірки відповідності заданим умовам та вимогам, які висуваються до зразків залізобетонних плит, були проведені відповідні випробування бетонних зразків, що виготовлені з використанням бетонної суміші, з якої були виготовлені зразки залізобетонних плит. Для цього випробовувалися зразки-куби з метою визначення відповідності міцності бетону зразка встановленим вимогам з використанням методики згідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Для формування дослідних зразків-кубів були застосовані стандартні форми ФК-100, конструкція та вигляд яких зображено на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Конструкція стандартної форма дослідних кубічних зразків з бетону ФК-100

Стандартна методика передбачає, що бетон заливається у форми ФК-100, і на наступній стадії ущільнювався на вібростолі ВМ-6.4 (80кг/2900/0,35...0,55), який призначений для ущільнення бетонних, асфальтобетонних розчинів бетонних сумішей у опалубкових формах за ДСТУ Б В.2.7-214:2009, ДСТУ 9292-1:2024, ДСТУ Б В.2.7-319:2016, ДСТУ Б В.2.7-309:2016 та ДСТУ Б В.2.7-187:2009.

Готові зразки на останній фазі виготовлення висушувалися у сушильній шафі впродовж 28 діб. Для висушування зразків застосовувалася сушильна шафа СНОЛ 3,5.35.3,5/3М.

Дослідження міцності бетону виконувалися для встановлення відповідності класу міцності бетону, який був визначений в програмі випробувань зразків залізобетонних плит. Відповідні технічні параметри бетону та арматури відповідно до конструктивних та технічних характеристик зразків залізобетонних

Таблиця 3.5

Технічні дані щодо компонентів залізобетону зразків порожнистих плит для

Найменування	Клас	Властивості	Параметри
Бетон важкий	C 30/35	рядовий, гідротехнічний	Кубікова міцність – не менше за 30 МПа
Арматура <i>d</i> <sub>3</sub> = 5 мм	A240C	звичайна арматурна сталь	Площа поперечного перерізу 19,635 мм <sup>2</sup> Міцність – 240 МПа
Арматура $d_2 = 5$ мм	A240C	звичайна арматурна сталь	Площа поперечного перерізу 19,635 мм <sup>2</sup> Міцність – 240 МПа
Арматура d <sub>1</sub> =16 мм	A500C	термомеханічно- зміцнена арматурна сталь	Площа поперечного перерізу 201,062 мм <sup>2</sup> Міцність – 500 МПа

вогневих випробувань

Для армування зразків залізобетонних порожнистих плит була застосована гарячекатана ребриста арматура виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», виготовлена за стандартом.

# 3.1.3. Розташування термопар у зразку конструкції для високотемпературних випробувань

На рис. 3.10 представлені схеми розташування термопар на необігрівній поверхні зразка залізобетонної плити для вогневих випробувань. Схема розташування термопар у зразку залізобетонної плити відповідає рекомендаціям стандартів щодо випробувань на вогнестійкість ДСТУ EN 1363-1:2023 (EN 1363-1:2020, IDT) і ДСТУ EN 1365-2:2023 [22–25]. Термопари мають таке розташування, щоб можна було отримати температурні дані на необігрівній

стороні плити і зафіксувати настання моменту втрати вогнестійкості за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності.

Граничний стан втрати теплоізолювальної здатності фіксується, коли досягнуто середньої температури за вимірами п'яти термопар 140 °C, або, коли досягнення температури за показниками на будь-якій термопарі 180 °C.

Крім цього, температура вимірюється за термопарами, що встановлені на робочій арматурі, як це показано на рис. 3.11. Температура робочої арматури визначалася як середнє значення за показниками термопар, що встановлені на кожному стержні зразків залізобетонної порожнистої плити, що піддаються вогневим випробуванням.



Рис. 3.10. Схема розташування термопар на поверхні зразків залізобетонної плити для вогневих випробувань



Рис. 3.11. Схема розташування термопар у робочій арматурі зразків залізобетонної плити для випробувань

За описаною методикою були виготовлені зразки залізобетонних плит для проведення випробувань, зображення одної з них проілюстровано на рис. 3.12.



Рис. 3.12. Вигляд зразка залізобетонної плити для випробувань із встановленими на ньому термопарами

На рис. 3.12 показані спеціально передбачені канали, в яких встановлені дроти термопар у перерізі зразка залізобетонної плити у такому порядку, як це показано на схемі на рис. 3.11.

Для фіксації показників температур за сигналами з термопар, встановлених у зразках залізобетонних плит застосовувалося відповідне програмне забезпечення, інтерфейс якого наведений на рис. 3.6.

За допомогою цього програмного забезпечення контролюється та здійснюється керування температурним режимом у робочому просторі печі, забезпечуючи його відповідність стандартному температурному режиму пожежі. Зазщначене програмне забезпечення є розробкою фахівців випробувального центру «Пожтест».

### 3.2. Методика вогневих випробувань зразків конструкцій

# 3.2.1. Методика початкової підготовки установки зразка конструкції до випробувань

В процесі підготовки до проведення випробувань, відповідно до ДСТУ EN 1365-2:2023 зразок був встановлений на стінках печі і відповідним чином закріплений, як це зображено на рис. 3.1. Для попередження витоку гарячих пічних газів з вогневої камери печі на зазори були покладені залізобетонні ущільнювачі у вигляді залізобетонних балок із мінераловатним ущільненням. Зазори та отвори між зразками залізобетонних плит, а також зразками та стінками печі були закриті за допомого цегляної кладки та плитами мінеральної вати товщиною 120 мм та густиною 120 кг/м<sup>3</sup>. Отвори оглядових люків для відповідної теплоізоляції були блоковані пінобетонними блоками завтовшки 150 мм та густиною 450 кг/м<sup>3</sup>.

#### 3.2.2. Методика здійснення вогневих випробувань зразків конструкцій

Вогневі випробування здійснювались у нормальних атмосферних умовах при температурі оточуючого середовища  $18^{\pm 1}$ °C і відносній вологості оточуючого повітря 55 %, що відповідає рекомендаціям норм [22]. Для проведення випробувань за допомогою бетонних блоків прикладалося розподілене навантаження, яке дорівнює  $0,5Q_{max}$ . Параметри навантажень та технологічні характеристика для його прикладання подані у табл. 3.6.

Навантаження за якого відбувається руйнування залізобетонної плити, визначалося відповідним розрахунком на міцність за допомогою звичайної деформаційної моделі. Методика визначення руйнівного навантаження описана у роботах [36, 138, 226].

Здійснення вогневих випробувань зразків залізобетонних плит відбувалося за методом, що відповідає рекомендаціям стандартів [22–25]. Рекомендований

Технічні характеристики навантаження, що прикладається до одного зразку залізобетонної плити

Зразок	Величина	Сумарна вага
	розподіленого	навантажувальних тягарів, т
	навантаження, Q, кH/м <sup>2</sup>	
Залізобетонна	5,72	4
плита		

метод вогневих випробувань заснований на визначенні відповідного проміжку часу від старту роботи пальників, що забезпечують стандартний температурний режим у вогневій камері печі згідно з рекомендаціями [22] за умови нагрівання нижньої сторони зразка залізобетонної плити [22], до моменту вимкнення пальників або фіксації настання одного з трьох граничних станів втрати вогнестійкості.

Час, коли фіксується настання того чи іншого граничного стану, за яким визначається втрата вогнестійкості, обчислюється за формулою [22]:

$$t_{fr} = t_{\rm mes} - \Delta t, \tag{3.1}$$

де *t<sub>fr</sub>* – час фіксації граничного стану зразка залізобетонної плити, який піддається вогневим випробуванням, хв;

*t*<sub>mes</sub> – тривалість від початку ввімкнення пальників до вимкнення пальників або досягнення граничного стану;

 $\Delta t$  – можлива похибка, яка може з'явитися під час фіксації часу в процесі випробувань.

Похибку, яка може виникнути під час фіксації часу протягом вогневих випробувань, визначають за допомогою виконання, таких розрахункових процедур.

Для проміжку часу від 0 до  $t_{\rm mes}$  розраховують інтегральну величину  $A_f$
середнього значення температури  $\theta_{fi}$  в печі під час випробування за такою формулою:

$$A_{f} = \sum_{i=1}^{n} 0.5 \left[ \theta_{fi} + \theta_{fi-1} \right] \left( t_{i} - t_{i-1} \right), \tag{3.2}$$

де  $\theta_{fi}$  – величина середнього значення температури у вогневій камери печі, яка відповідає часу  $t_i$ , °С;

*t<sub>i</sub>* – час *i*-го моменту вимірювання середнього значення температури у вогневій камери печі;

*i* – номер моменту вимірювання середнього значення температури у вогневій камери печі, який рівний часу *t<sub>i</sub>*, якщо інтервал між вимірюваннями становить 1 хв;

n – загальна кількість моментів вимірювання, який визначається часом  $t_i = t_{\text{mes}}$ .

Так само для проміжку часу у діапазоні 0 до  $t_{mes}$  розраховують інтегральну величину  $A_s$  температури  $\theta_{si}$  стандартного температурного режиму пожежі за виразом:

$$A_{f} = \sum_{i=1}^{n} 0.5 \left[ \theta_{si} + \theta_{si-1} \right] (t_{i} - t_{i-1}),$$
(3.3)

де  $\theta_{si}$  – значення температури стандартного температурного режиму пожежі, яке відповідає часу  $t_i$ , °С.

Вираз для обчислення величини температури  $\theta_{si}$  у залежності від часу рекомендовано в [22].

У залежності від отриманих значень інтегральних величин похибка визначається у разі виконання певних умов.

Якщо  $A_t \ge A_s$ , то похибка  $\Delta t = 0$ .

Якщо  $A_f < A_s$ , тоді похибку  $\Delta t$  розраховують за формулою:

$$\Delta t = (0,015 t_{\rm mes} + 3) (A_s - A_f) / (A_s - A_{\rm min}), \qquad (3.4)$$

де  $A_{\min}$  – інтегральна величина мінімально допустимого значення температури  $\theta_{\min}$  для проміжку часу від 0 до  $t_{\max}$ , °С·хв.

Значення А<sub>тіп</sub> визначають за формулою, аналогічною формулам (3.3) і (3.4):

$$A_{f} = \sum_{i=1}^{n} 0.5 \left[ \theta_{\min i} + \theta_{\min i-1} \right] (t_{i} - t_{i-1}), \qquad (3.5)$$

де  $\theta_{\min i}$  – величина мінімально допустимого значення температури  $\theta_{\min}$ , відповідна моменту часу  $t_i$ , °С.

Значення температури  $\theta_{\min}$  обчислюють за формулою:

$$\theta_{\min} = \theta \left( 1 - |0,01d| \right), \tag{3.6}$$

де *d* – допустиме мінімальне відхилення значення середньої температури у вогневій камері печі у залежності від температури  $\theta_{si}$ , %.

Момент часу, коли фіксуються один з трьох граничних станів, визначається за критичною величиною максимального прогину зразка залізобетонної плити та швидкості зростання значення максимального прогину.

Значення максимального прогину зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням, вимірювалося у двох контрольних точках всередині нижньої поверхні зразка залізобетонної плити, як це показано на схемі рис. 3.10. Як додатковий комплекс експериментальних даних додатково вимірювались всі істотні горизонтальні деформації, які перевищують 5 мм у центрі обігрівної поверхні зразка залізобетонної плити та посередині висоти вертикального краю зразка залізобетонної плити на відстані 50 мм від її краю. Умовами припинення випробувань був факт досягнення одного з граничних станів, або досягнення встановленого максимального часу випробувань. Фіксація настання граничного стану проводиться відповідно до рекомендацій стандартів [22–25], і які добре викладені у першому розділі цієї роботи. Для розрахунку критичних значень максимального прогину та швидкості його наростання застосовані вирази:

$$D = \frac{L^2}{400h}, \ \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000h},$$
(3.7)

де *L* – довжина плити; *h* – висота перерізу плити.

Використовуючи формули (3.7), були розраховані значення цих параметрів. Таким чином, максимальний прогин зразків залізобетонних плит, підданих випробуванням становить 230,114 мм, граничне значення швидкості наростання вертикальної деформації 10,227 мм/хв.

Згідно із рекомендаціями стандартів ДСТУ ЕN 1363-1:2023 (EN 1363-1:2020, IDT), ДБН В.1.1-7-2016, EN 1992-1-2:2012, умова настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності виконується, коли величина середнього всієї необігрівної поверхні значення температури зразка залізобетонної порожнистої плити, підданого випробуванням, підвищується на 140 °C, а величина максимального значення температури у будь-якій точці необігрівної поверхні зразка залізобетонної порожнистої плити, підданого випробуванням, підвищується на 180 °С. У багатьох випадках вважається, що у разі досягнення температури 160 °С на необігрівній поверхні фіксується настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності матеріалу. Якщо за встановлений час випробування стану втрати теплоізолювальної здатності не спостерігається, вважається що за таким граничним станом зразок залізобетонної порожнистої плити, підданий випробуванням, відповідає встановленому потрібному класу

вогнестійкості.

Настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності фіксується у той момент часу, коли спостерігаються наскрізні тріщини або отвори, крізь які можуть проникати продукти згоряння, полум'я тощо. Критерії настання стану за ознакою втрати цілісності контролюються за трьома ознаками: загоряння або тління зі свіченням ватного тампона, який розташований на відстані від 20 мм до 30 мм до необігрівної поверхні зразка залізобетонної плити поблизу місць отворів або тріщин протягом часу не менше ніж 30 с; утворення тріщин, крізь які можна вільно без додаткових зусиль ввести вглиб матеріалу зразка щуп діаметром 6 мм і заглибити його між берегами цієї тріщини на відстань не менше 150 мм; утворення тріщини або отвору, крізь які можна вільно без зусиль ввести вглиб матеріалу зразка щуп діаметром 25 мм; на необігрівній поверхні зразка візуалізується полум'я у проміжок часу не менше ніж 10 с.

### 3.3. Результати попередніх експериментальних досліджень бетону, використаного у конструкції

Для попереднього оцінювання відповідності міцності бетону встановленому класу міцності для зразків залізобетонних плит, який вказаний у відповідній технічні документації, була застосована усталена методика випробувань бетону на міцність згідно із відповідним стандартом ДСТУ Б В.2.7-214:2009. При цьому проводилися випробування на міцність бетонних кубічних зразків, що реалізовувалися з використанням гідравлічного преса МС-1000. Зображення випробувального гідравлічного пресу наведено на рис. 3.13.

Для випробувань було виготовлено бетонні зразки кубічної форми. Бетонні зразки-куби мали ширину ребра 100 мм, як це рекомендовано у стандарті ДСТУ Б В.2.7-214:2009.

Зовнішній вигляд зразків-кубів бетону для випробувань на міцність показаний на рис. 3.14.



Рис. 3.13. Гідравлічний прес MC-1000 для випробувань на міцність кубічних зразків бетону



Рис. 3.14. Вигляд бетонних кубічних зразків для випробувань на міцність

Результати випробувань на міцність бетону, з якого були виготовлені зразки залізобетонних плит, зазначені у табл. 3.1. Результати випробувань – це значення міцності кубічних зразків бетону, які були одержані з використанням виміряних показників сили, що призводить до руйнування зразків з бетону. Для оцінювання похибки у табл. 3.7 наведені визначені значення відхилень кубічної міцності.

Зовнішній вигляд кубічних зразків бетону після випробувань зображений на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Зовнішній вигляд кубічних зразків бетону після проведення їх випробувань на міцність: *а* – руйнування бетону шляхом осипання або відшарування частини поверхні; *б* – утворення тріщин у бетонному зразку внаслідок навантаження; *в* – інтенсивне руйнування бетону з утворенням значних пошкоджень та відшаруванням матеріалу.

На рис. 3.15 показано характер руйнування та особливості пошкоджень, кубічних зразків бетону, отриманих у процесі навантаження.

### Таблиця 3.7.

	Модуль пружності	Міцність бетону,	Визначений	Імовірність
	(початковий), Е <sub>b</sub> ×	$f_{cd}$ , МПа	клас міцності	правильного
a30K	$ imes 10^4  \mathrm{M}\Pi \mathrm{a}$		бетону	оцінювання
3p				класу міцності,
				%
Nº 1	1,74	33	C30/35	
Nº 2	1,64	33	C30/35	
Nº 3	1,33	31	C30/35	100
<u>№</u> 4	1,11	34	C30/35	100
<u>№</u> 5	1,16	30	C30/35	
<u>№</u> 6	1,49	30	C30/35	

Результати випробувань на міцність бетонних зразків

Результати, що подані у табл. 3.7, свідчать про те, що бетон, який був використаний для виготовлення зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням, відповідає стандартному класу міцності бетону С30/35. Отриманий клас міцності бетону збігається із тим класом бетону, який був визначений в обраній методиці експерименту.

Для встановлення густини бетонних зразків-кубів була також використана стандартна методика вимірювань, рекомендована у ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Ця методика заснована на зважуванні зразків, що дозволяє визначити їхню густину з високою точністю.

При зважуванні бетонних кубічних зразків, які піддавалися випробуванням на міцність, використовувалися електронні ваги ACS-15A. Для забезпечення достовірності результатів кожен зразок зважувався тричі, після чого визначалося середнє значення його маси. Отримані результати зважування зразків бетону вказані у табл. 3.8, де також подані обчислені значення густини бетону на основі цих даних.

Аналіз отриманих результатів дозволяє оцінити рівномірність структури матеріалу та можливий вплив різних факторів на зміну густини бетону, що має важливе значення для подальших досліджень його фізико-механічних характеристик.

Таблиця 3.8.

Дані щодо визначення густини бетону кубічних зразків для випробування на

	Виміряна	вага	Густина	бетону	Середня	густи	на
OK	кубічного	зразка з	кубічного	зразка,	кубічних	зразків	3
3pa3	бетону, кг		кг/м <sup>3</sup>		бетону, кг	$/M^3$	
Nº 1	2,3	41	2341		231	8,167	
Nº 2	2,3	19	2319		231	8,167	
Nº 3	2,2	64	2264		231	8,167	
N <u>∘</u> 4	2,3	14	2314		231	8,167	

міцність

Продовження таблиці 3.8

Nº 5	2,316	2316	2318,167
Nº 6	2,355	2355	2318,167

За отриманими результатами проведених попередніх досліджень густини бетону кубічних зразків для випробування, які подані у табл. 3.8, було виявлено, що середнє значення густини бетону досліджуваних кубічних зразків бетону, що піддаються випробуванням на міцність, становить 2318,167 кг/м<sup>3</sup>.

Зважаючи на те, що кубічні зразки з бетону для попередніх досліджень мали склад бетонної суміші, який є повністю ідентичним складу бетонної суміші для виготовлення бетону зразків досліджуваних залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням, можна зробити висновок, що зразки залізобетонних плит виготовлені з бетону, який відповідає вимогам методики проведення експерименту, викладеній у цьому розділі роботи.

**3.4.** Результати вогневих випробувань зразків конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі

# 3.4.1. Результати вивчення температурних показників зразків конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі

Під час проведення вогневих випробувань відбувалася фіксація температурних показників у вогневій камері печі випробувальної установки. Зафіксовані показники температури у вогневій камері печі випробувальної установки під час випробувань зразків залізобетонних плит подані на рис. 3.16.

За отриманими результатами вимірювання температури у вогневій камері печі установки під час випробувань зразків залізобетонних плит були побудовані відповідні графіки, подані на рис. 3.17.

Графіки, наведені на рис. 3.16 та рис. 3.17 свідчать про те, що внутрішня температура у камері печі за всіма показниками термопар у відповідних точках

обчислюється середнє значення температури за всіма показниками термопар, встановлених у просторі печі.



Рис. 3.16. Результати вимірювання температури у вогневій камері печі під час випробування зразків залізобетонних порожнистих плит: вимірюваннями 1 термопари; ••• – за вимірюваннями 2 термопари; ••• – за вимірюваннями 4 термопари; ••• – за вимірюваннями 5 термопари; ••• – за вимірюваннями 6 термопари



Рис. 3.17. Показники термопар у камері печі під час випробувань зразків сталезалізобетонних плит першого типу: 99 — за вимірюваннями 1 термопари; ••• – за вимірюваннями 2 термопари; ••• – за вимірюваннями 3 термопари; ••• – за вимірюваннями 4 термопари; ••• – за вимірюваннями 5 термопари; ••• – за вимірюваннями 6 термопари; — – середнє значення температури у вогневій камері печі

За побудованим графіком середньої температури за показниками всіх

термопар у просторі вогневої камери печі була проаналізована відповідність відхилень середньооб'ємної температури від допустимих для стандартного температурного режиму пожежі. Результати проведеного аналізу наведені на рис. 3.18. На цьому рисунку крива величини середньої температури побудова разом із рекомендованими діапазонами максимального та мінімального відхилень, а також відхиленнями, що обчислені за показниками термопар всередині вогневої камери печі [22].



Рис. 3.18. Відповідність температурного режиму випробувань в печі до стандартного температурного режиму: *1* – середня температура, *2* – стандартна температурна крива, *3* – допустимі відхилення середньої температури в печі

Температурні криві, показані на рис. 3.18, свідчать про те, що відповідність стандартного температурного режиму пожежі у вогневій камері печі під час випробувань зразків залізобетонних порожнистих плит до вимог ДСТУ ЕN 1363-1:2023 (EN 1363-1:2020, IDT) та ДСТУ EN 1365-2:2023 (EN 1365-2:2014, IDT) забезпечений.

Методика експерименту щодо проведення вогневих випробувань зразків залізобетонних плит, яка описана у 3 розділі цієї роботи, зумовлює проведення вимірювань температури у робочій арматурі та на необігрівній поверхні плити. На рис. 3.19 показані температурні криві робочих арматурних стержнів, що вимірювалися згідно із схемою вимірювань, яка подана на рис. 3.11 досліджуваних зразків залізобетонних плит.



Рис. 3.19. Показники термопар, розташованих на стержнях робочої арматури зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням

Після проведення аналізу кривих, зображених на рис. 3.19, було виявлено, що існує помітна розбіжність температур між показниками термопар, встановлених на серединних стержнях робочої арматури зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробувань. Також слід зазначити, що максимальна температура на арматурних стержнях після 50 хв випробування сягає 254 °C, що відповідає даним, відомим з [36] та відповідно до [246–248]. Крім цього, можна прослідкувати наявність ділянки, де температура не змінюється з плином часу випробування, що зумовлюється випаровуванням вологи з пористої структури цементного каменя бетону зразків залізобетонних плит.

При проведенні аналізу якісних показників отриманих експериментальних даних шляхом вимірювання температури у стержнях робочої арматури зразків залізобетонних плит, були побудовані криві середньої температури у стержнях зразків залізобетонних плит робочої арматури V залежності від часу Ha показані обчислені випробування. побудованих кривих вілхилення температури за показниками термопар від середнього значення. Побудовані криві із обчисленими відхиленнями показані на рис. 3.20.

За побудованими кривими, які зображені на рис. 3.20, можна зробити висновок, що отримані результати вимірювань в арматурних стержнях є якісними, оскільки відхилення є невеликими, отримані криві для різних зразків залізобетонних плит істотно не відрізняються, помітні викиди отриманих температурних показників не спостерігаються. Тож можна зазначити, що результати вимірювань температури в стержнях робочої арматури зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням є якісними та достовірними.



Рис. 3.20. Середня температура із відхиленнями у стержнях робочої арматури зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням

Для вивчення температурних показників на необігрівній стороні зразків залізобетонних порожнистих плит були проведені відповідні вимірювання за схемою, що показана на рис. 3.10. Відповідно до показників, отриманих у результаті вимірювань, були побудовані відповідні температурні криві у залежності від часу. На рис. 3.21 показані побудовані криві температурних залежностей у встановлених контрольних точках на необігрівній поверхні зразків залізобетонних плит, де були розташовані термопари згідно із прийнятою методикою експериментів.

З метою перевірки достовірності отриманих результатів було побудовано графік розкиду температур. На рис. 3.22 поданий побудований графік середнього значення температур на необігрівній стороні зразків залізобетонних плит. Також на ньому показані відхилення обчислені при порівнянні з результатами вогневих випробувань зразків залізобетонних плит, підданих випробуванням.



Рис. 3.21. Результати вимірювання температури на необігрівній поверхні залізобетонної порожнистої плити: *а* – перший зразок; *б* – другий зразок: ₱₱₽ – показники 1 термопари; ∞∞ – показники 2 термопари; ☆▲☆ – показники 3 термопари; ••• – показники 4 термопари; ••• – показники 5 термопари



Рис. 3.22. Середня температура із відхиленнями на необігрівній стороні зразків залізобетонних плит: *а* – перший зразок; *б* –другий зразок

Аналіз температурних кривих, отриманих за показниками термопар на необігрівній поверхні зразків залізобетонних плит, поданих на рис. 3.22, показав, що побудовані криві значень середньої температури залежно від часу вогневих випробувань зразків залізобетонних плит є подібними і розрізняються на 15–30 °C. Найбільші відхилення виникали на часовій ділянці з 30 хвилини до 50 хвилини проведення випробувань. Це пов'язується із тим, що нагрівання внутрішніх шарів зразків залізобетонних плит під вогневим впливом до високих

температур та внаслідок дії механічного навантаження спостерігається інтенсивне утворення тріщин та роздроблення у бетоні. Зважуючи на те, що температура у всіх контрольних точках необірівної поверхні зразків залізобетонних плит не перевищує значень 140 °C, можна казати про відсутність появи втрати вогнестійкості через виникнення граничного стану втрати теплоізолювальної здатності.

#### 3.4.2. Результати вимірювань деформацій залізобетонних плит-зразків

Протягом випробувань на 50-ій хв було зафіксовано обвалення одного зразка залізобетонної порожнистої плити, як це показано на рис. 3.23.



Рис. 3.23. Руйнування одного із зразків залізобетонної плити під вогневим впливом під час випробувань

Тобто можна сказати, що на 50-ій хв вогневого випробування була зафіксована втрата вогнестійкості одного із зразків залізобетонної плити за настанням стану втрати несучої здатності.

У результаті вимірювань, проведених в процесі вогневих випробувань зразків залізобетонних плит, були вивчені переміщення серединних точок зразків плит під час дії теплового впливу стандартного температурного режиму. На рис. 3.24 представлені побудовані криві часових залежностей величини найбільшого прогину зразків залізобетонних плит. Криві, зображені на рис. 3.24, для фіксації настання граничного стану втрати несучої здатності доповнені горизонтальною лінію, що виражає критичне значення максимального прогину, який обчислений за формулою (3.24).



Рис. 3.24. Залежність від часу найбільшого прогину зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням

Ці графіки, подані на рис. 3.24, дозволяють ідентифікувати настання втрати вогнестійкості за настанням граничного стану втрати несучої здатності на 50-ій хв проведення вогневих випробувань. Після настання граничного стану втрати несучої здатності зразка № 1 залізобетонної порожнистої плити випробування припинилося.

На рис. 3.25 представлені криві часових залежностей швидкості зростання максимального прогину у досліджуваних зразках залізобетонних плит, на яких також зафіксовано втарта несучої здатності на 50-ій хв.

Також слід зазначити, що контроль настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності та контроль появи тріщин і роздроблення у бетоні зразків залізобетонних порожнистих плит, підданих випробуванням, з використанням методики, описаною у цьому розділу роботи, показав неможливість встановити появи цього граничного стану за критеріями, описаними у стандартах ДСТУ EN 1363-1:2023 (EN 1363-1:2020, IDT) та ДСТУ EN 1365-2:2023 (EN 1365-2:2014, IDT).



Рис. 3.25. Залежність від часу швидкості зростання найбільшого прогину зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням

Загалом встановлено, що проведені вогневі випробування показали, що досліджувані зразки залізобетонних порожнистих плит відповідають стандартному класу вогнестійкості REI 45, оскільки граничний стан втрати несучої здатності був зафіксований на 50-ій хв вогневих випробувань.

З метою встановлення достовірності виміряних показників деформаційних характеристик під час вогневих випробувань зразків залізобетонних порожнистих плит були проведені відповідні розрахунки статистичних характеристик. На рис. 3.26 показана крива залежності середнього значення найбільшого прогину досліджуваних зразків залізобетонних порожнистих плит, яка доповнена найбільшими відхиленнями цих показників.

Як можна побачити з рис. 3.26 помітних викидів при вимірюваннях максимального прогину зразків залізобетонних порожнистих плит під час їх вогневих випробувань не зафіксовано, криві прогину для обох зразків є подібними.



Рис. 3.26. Залежність середнього значення максимального прогину залізобетонних порожнистих плит із відхиленнями

Тож можна зробити висновок, що виміряні значення деформаційних характеристик зразків залізобетонних плит є достовірними, а їхнє фіксування було проведено якісно.

# 3.4.3. Результати дослідження тріщин та дефектів зразків залізобетонних порожнистих плит під час їхніх вогневих випробуваннях

Під час вогневих випробувань зразків залізобетонних порожнистих плит були отримані фотоматеріали, на основі яких було вивчено протікання процесу тріщиноутворення та роздроблення бетону цих зразків залізобетонних порожнистих плит.

На рис. 3.27 представлені фотографії тріщин у зразках залізобетонних порожнистих плит, зроблені на фінальній стадії випробувань перед настанням граничного стану втрати несучої здатності.

Виявлено утворення магістральних поздовжніх тріщин унаслідок температурного розширення нижніх шарів бетону плити (рис. 3.27-а).







Рис. 3.27. Зовнішній вигляд тріщин, що з'явилися у досліджуваних зразках залізобетонних порожнистих плит в умовах вогневих випробувань: *a* – поздовжні тріщини внаслідок температурного розширення нижніх шарів бетону плити, *б* – поперечні тріщини, внаслідок утворення призми руйнування

Виникнення тріщин (рис. 3.27-б) у шарі бетону досліджуваних зразків залізобетонних плит також було досліджено. Їхня форма та характер їхнього розподілу наведений на рис. 3.28.

Аналіз конфігурації та розподілу тріщин, поданих на рис. 3.28 дозволяє зробити наступні висновки. Тріщини, що мають наскрізний характер з'являються посередині прольоту зразків залізобетонних плит, підданих випробуванням. Наскрізні тріщини мають розгалужений характер, що дозволяє прослідкувати утворення так званої призми руйнування, описаної у [246]. Утворення косих тріщин поблизу опор, викликаних поперечними силами, не мало наскрізного характеру і їх можна не розглядати як такі, що мають потенціал наскрізних. Утворення наскрізних тріщин було зафіксовано суттєво раніше ініціації процесу руйнування зразка залізобетонної порожнистої плити, підданої вогневим випробуванням.



Рис. 3.28. Форма та характер розподілу тріщин у бетоні зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуванням у час перед руйнуванням одного з зразків: *а* – зразок № 1; *б* – зразок № 2

Для вивчення динаміки утворення пошкоджень у бетоні зразків залізобетонних плит, підданих випробуванням було визначено середню висоту утворених тріщин. Середнє значення висоти тріщин визначалося за допомогою лазерного дальноміра у ході проведення випробувань. На рис. 3.29 представлені криві залежності середньої висоти візуальних тріщин від часу проведення вогневих випробувань.

Отримані результати проведених вимірювань, які здійснювалися протягом вогневих випробувань зразків залізобетонних плит доводять, що перебіг процесів, відбувалися, відповідають теоретичним які уявленням та результатам експериментів, що були отримані для залізобетонних порожнистих плит в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі, наведених у роботах [36, 246–259]. Під час вогневих випробувань досліджуваних 226. зразків залізобетонних плит зафіксовано постійне збільшення максимального прогину посередині прольоту вниз у сторону, з якої здійснюється тепловий вплив у вогневій камері печі. Криві залежності температурних показників на необігрівній поверхні зразків залізобетонних плит, підданих вогневим випробуваням,

включали ділянку із сталим характером при зберіганні протягом певного часу величини температури близько 100 °C, що пов'язується із процесами випарювання наявної вологи у пористій структурі бетону.



Рис. 3.29. Криві залежностей середньої висоти нормальних тріщин від часу вогневих випробувань зразків залізобетонних порожнистих плит: *1* – зразок № 1; *2* – зразок № 2

Також слід зазначити, що необігрівна поверхня зразків залізобетонних плит не прогрівалася до температури більше величини 100 °C.

Показники температур, виміряних у вогневій камері печі випробувальної установки, мали несуттєвий розкид, що доводить добру відтворюваність стандартного температурного режиму під час проведення вогневих випробувань. Можна зафіксувати, що циркуляція пічних газів у вогневій камері, а також суттєве пароутворення впливають на процес вимірювання незначно.

Також спостерігався несуттєва різниця величин температури на необігрівній поверхні, що була зафіксована термопарами під час вогневих випробуванб досліджуваних зразків залізобетонних порожнистих плит.

Помітний розкид спостерігався у випадку вимірювань температури на необігрівній поверхні зразків залізобетонних плит. Це можна пояснити помітною залежністю показників вимірювань від процесів його розтріскування бетону та випарними процесами вологи у його порах.

Також, можна зазначити, що розкид величин максимального прогину між досліджуваними зразками залізобетонних плит мав незначну величину.

#### 3.5. Дослідження статистичних показників експериментальних даних

У результаті проведених вогневих випробувань для двох зразків-близнюків залізобетонних плит було отримано комплекс експериментальних даних у вигляді показників температур, деформаційних характеристик та даних щодо конфігурації та розташування тріщин у бетоні. З метою оцінювання адекватності отриманих експериментальних даних були вивчені відповідні статистичні показники. Було прийнято, що основним статистичним показником є дисперсія відтворюваності, що обчислювалася за формулою [260–263]:

$$S_{\rm cep}^{2} = \frac{1}{d(n-1)} \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{d} \left[ \frac{y_{kj}^{e} - \bar{y}_{k}^{e} - \delta_{_{\rm GUM}}}{\bar{y}_{k}^{e}} \right]^{2}, \qquad (3.8)$$

у<sup>е</sup><sub>kj</sub> – поточний вибірковий експериментальний показник;

 $\bar{y}_k^e$  – середній поточний вибірковий показник;

*d*-число експериментальних ситуацій;

*n* – число вибіркових вимірювань;

*б<sub>вим</sub>* – найбільша допустима вимірювальна похибка відповідно до [263, 264].

У табл. 3.9 наведені величини дисперсії температурних даних для різних контрольних точок вимірювання.

Таблиця 3.9

Статистичні показники щодо відтворюваності вимірювань температури

	Температурні дані		
Параметр	Камера печі	Необігр.	Арматура
		поверхня	

Продовження таблиці 3.9

Максимальне відхилення від середнього значення, °С	114,6	36,9	56
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	12,04	9,4	9,46
Дисперсія відтворюваності, $S_{cep}^{2}$	0,14	0,61	0,24

Дані, наведені у табл. 3.9, свідчать про існування помітного розкиду експериментальних даних, проте він є несуттєвим у межах найбільшої допустимої похибки.

Також одержані дані щодо величин дисперсії відтворюваності для результатів вимірювання температури мають бути використані для вивчення адекватності розрахункових даних, що були отримані за допомогою математичного моделювання, основні аспекти якого описані у 2 розділі роботи.

У табл. 3.10 подані значення дисперсії показників найбільшого прогину досліджуваних зразків залізобетонних порожнистих плит.

Таблиця 3.10

3.6		•	9		•	<b>—</b> ·
Мак	симальне	відхилення	Середнє		відносне	Дисперсія
В1Д	середнього	значення,	відхилення	ВІД	середнього	відтворюваності,
						2
MM			значення, %	)		$S_{cep}^{2}$
						1
	4.06			9,64		0,654
	· · · ·			, -		, -

Статистичні показники щодо вимірювань найбільшого прогину

У табл. 3.11 зведені величини дисперсії даних швидкості зростання найбільшого прогину досліджуваних зразків залізобетонних порожнистих плит.

203

Максимальне відхилення	Середнє відносне	Дисперсія
від середнього значення,	відхилення від середнього	відтворюваності,
MM/XB	значення, %	$S_{cep}^{2}$
6,44	6,04	0,421
6,28	6,41	0,498

Показники відтворюваності швидкості зростання найбільшого прогину

Статистичні показники, наведені у табл. 3.10 та табл. 3.11, вказують на прийнятну відтворюваність показників вимірювання. Тож можна вважати, що отримані експериментальні дані можна вважати адекватними.

Здійснені дослідження дають змогу стверджувати, що отримані експериментальні дані щодо вимірювання температур у точках контролю у вогневій камері печі установки для випробувань досліджуваних зразків залізобетонних плит, на необігрівних поверхнях досліджуваних зразків та стержнях робочої арматури вимірювалися згідно із розробленою методикою проведення експериментального вивчення поведінки під час теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Результати, що отримані під час проведення експерименту є адекватними.

Таким чином, експериментальні дані, отримані в процесі випробувань можна застосувати для оцінювання адекватності результатів математичного моделювання, поданих у 2 розділі.

# 3.6. Оцінювання адекватності результатів математичного моделювання поведінки фрагмента конструкції в умовах вогневих випробувань

З використанням результатів вогневих випробувань, що висвітлені у цьому розділі, які отримані під час розрахунку за методиками розділу 2 цієї роботи, був виконаний аналіз адекватності результатів математичного моделювання поведінки досліджуваних залізобетонних порожнистих плит під тепловим

впливом стандартного температурного режиму пожежі. На рис. 3.30 показані розрахункові та експериментальні криві залежності показників середньої температури у стержнях робочої арматури, отримані під час вогневих випробувань зразків залізобетонних плит та у результаті проведення математичного моделювання.

Порівняльний аналіз побудованих температурних кривих у арматурних стержнях показує, що відмінність між ними є помітною, проте можна зазначити, що така відмінність не є істотною.

Можна вважати, що отримані дані шляхом математичного моделювання є адекватними і такими що доволі точно відтворюють теплові процеси у залізобетонних плитах під час їхнього нагрівання за стандартним температурним режимом.



Рис. 3.30. Залежності температури у середньому арматурному стержні від часу випробування зразків залізобетонних плит: *1* – за результатами вогневих випробувань; *2* – за результатами обчислень

На рис. 3.31 представлені експериментальні дані та дані математичного моделювання величин поширення середньої температури на необігрівній поверхні досліджуваних залізобетонних плит під час впливу стандартного температурного режиму пожежі в умовах вогневих випробувань.



Рис. 3.31. Величини середньої температури на необігрівній поверхні досліджуваних залізобетонних плит під час впливу стандартного температурного режиму пожежі: *1* – за результатами вогневих випробувань; *2* – за результатами обчислень

На рис. 3.32 представлені експериментальні дані, та дані, отримані шляхом математичного моделювання, щодо величини середнього максимального прогину при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі на досліджувані залізобетонні порожнистої плити.



Рис. 3.32. Залежність середнього значення найбільшого прогину залізобетонних плит: 1 – за результатами вогневих випробувань; 2 – за результатами обчислень

Аналізуючи криві, представлені на рис. 3.31, рис. 3.32, можна помітити, що експериментальні та розрахункові показники досліджуваних величин відрізняються незначно і є близькими одне до одного. Попередньо можна також

зазначити, що розрахункові дані достатньо правдоподібно відтворюють процес вогневих випробувань зразків залізобетонних плит під впливом стандартного температурного режиму випробувань.

Для подальшого аналізу адекватності даних, отриманих у результаті математичного моделювання у разі їхнього порівняння із експериментальними, було здійснено обчислення критерію Фішера за виразом [260–263]:

$$F_{c} = \frac{S_{ad}^{2}}{S_{cep}^{2}} \le F(v_{1}, v_{2}, \alpha), \qquad (3.9)$$

де  $S_{ad}^2$  – дисперсія адекватності;

 $S_{cep}^2$  – дисперсія відтворюваності даних експерименту, яка обчислюється за рівнянням (3.8);

 $v_l = d$  – число ступенів вільності у чисельнику;

 $v_2 = n - 1 -$ число ступенів вільності у знаменнику;

 $\alpha = 0.05 -$ рівень значущості;

параметр *n* – це число вимірювань в цьому експерименті;

*d*-число експериментів;

дисперсія адекватності обчислюється за рівнянням:

$$S_{ad}^{2} = \frac{d}{n-1} \sum_{k=1}^{n} \left[ \frac{\bar{y}_{k}^{e} - y_{k}}{\min\left( \left| \bar{y}_{k}^{e} \right|, \left| y_{k} \right| \right)} \right]^{2}, \qquad (3.10)$$

де  $\bar{y}_k^e$  – середнє значення вимірювань вибіркового показника;  $y_k$  – поточний розрахунковий показник.

Як окремий експеримент розглядалося випробування одного із зразківблизнюків залізобетонної порожнистої плити. Результати обчислень адекватності температурних даних щодо необігрівної поверхні залізобетонних плит, отриманих у результаті математичного моделювання подані у табл. 3.12.

### Таблиця 3.12

Статистичні характеристики для дослідження адекватності розрахункових значень температури на необігрівній стороні залізобетонних порожнистих плит

2	Кількість ступенів вільності у чисельнику, <i>v</i> 1
52	Число ступенів вільності у знаменнику, <i>v</i> 2
2	Число експериментів, <i>d</i>
52	Число вимірювань в одному експерименті, <i>n</i>
0,64	Дисперсія відтворюваності, $S^2_{ m cep}$
0.591	Дисперсія адекватності, S <sup>2</sup> <sub>ad</sub>
0,948	Обчислена величина F-критерію.
1,01	Таблична величина F-критерію. [256, 266].
14,1	Середнє відносне відхилення, %
16,4	Середньоквадратичне відхилення, °С

Результати розрахункового оцінювання адекватності даних математичного моделювання для найбільшого прогину під час вогневих випробувань залізобетонних плит зведені до табл. 3.13.

Таблиця 3.13

Статистичні характеристики для дослідження адекватності розрахункових значень найбільшого прогину залізобетонних порожнистих плит

2	Кількість ступенів Вільності у чисельнику, $\nu_1$
52	Число ступенів вільності у знаменнику, v <sub>2</sub>
2	Число експериментів, <i>d</i>
52	Число вимірювань в одному експерименті, <i>п</i>
0.346	Дисперсія відтворюваності, $S^2_{ m cep}$
0.175	Дисперсія адекватності, S <sup>2</sup> <sub>ad</sub>
0,69	Обчислена величина F-критерію.
1,01	Таблична величина F-критерію. [265, 266].
8,4	Середнє відносне відхилення, %
11	Середньоквадратичне відхилення, мм

Висновок про адекватність результатів математичного моделювання було зроблено на основі порівняння розрахункової величини F-критерію з відповідним табличним значенням при рівні значущості 0,05. Величини статистичних характеристик, наведені у табл. 3.12 та табл. 3.13, вказують на те, що дані, одержані за методиками математичного моделювання на основі застосування МСЕ, є адекватними, оскільки величина F-критерію у всіх випадках не перевищує табличної величини.

Отже, аналіз адекватності даних, отриманих у результаті математичного моделювання, яке здійснене за запропонованими методиками, описаними у 2 розділі роботи на основі застосування МСЕ, доводять, що статистичні критерії, прийняті для аналізу, задовольняються. Це вказує на адекватність одержаних даних у результаті математичного моделювання.

З метою встановлення відповідності зображення розподілення тріщин в бетоні зразків залізобетонних плит, що піддаються вогневим випробуванням, та подібної картини, яка є результатом математичного моделювання, був проведений порівняльний аналіз. На рис. 3.33 наведено картини, отримані обома шляхами.



Рис. 3.33. Картини розподілення тріщин: за результатми проведення вогневих випробовувань: *a* – зразок №1, *б* – зразок №2; *в* – за результатми математичного моделювання

Аналізуючи отримані картини розподілення тріщин, можна помітити, що вони мають подібний характер, включаючи наявність призми руйнування у стиснутій зоні бетону залізобетонних порожнистих плит. Тож можна зазначити, що в такому випадку математичне моделювання розподілу тріщин у бетоні залізобетонних плит дає правдоподібні результати.

Враховуючи викладене, можна зробити висновок, що запропоновані методики математичного моделювання можна використовувати для здійснення аналізу цілісності залізобетонних порожнистих плит, які піддаються дослідженням на вогнестійкість.

#### 3.7. Висновки до розділу

За результатами проведених досліджень можна вказати на такі основні висновки:

 основними об'єктами для експериментального дослідження є два зразкиблизнюки серійних залізобетонних порожнистих плит, виготовлені з важкого бетону однакового складу на силікатному заповнювачі (гранітний щебінь), що відповідає класу міцності С 30/35 і робочою арматурою класу А500С діаметром 16 мм, та додатковою А240С діаметром 5 мм;

 основні експериментальні дослідження зразків залізобетонних порожнистих плит проводилися з використанням випробувальної установки, яка має вогневу піч з нагрівальною системою, що працює за рахунок спалювання дизельного палива з автоматичним комп'ютерним регулюванням з прикладанням діючого механічного навантаження за допомогою бетонних калібрувальних блоків;

• випробування зразків залізобетонних порожнистих плит виконувалися протягом контрольного часу, що відповідає найбільшому часу граничного стану для плит перекриттів відповідно до стандартного класу вогнестійкості REI 60 згідно ДБН 1.1.7 – 2016 на основі розробленої методики. Методика містить аналіз температурних показників, параметрів напружено-деформованого стану, а також

дослідження передумов утворення та розвитку наскрізних тріщин, що можуть бути пов'язані з настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності в умовах впливу пожежі;

• фіксація настання того чи іншого граничного стану втрати вогнестійкості зразками залізобетонних порожнистих плит проводилася на основі критеріїв та ознак, що викладені у стандарті, що регламентує випробування на вогнестійкість ДСТУ EN 1363-1:2023 (EN 1363-1:2020, IDT) та ДСТУ EN 1365-2:2023 (EN 1365-2:2014, IDT);

• визначені статистичні характеристики показників вимірювань в процесі проведення вогневих випробувань зразків залізобетонних порожнистих плит вказують на допустиму відтворюваність експериментальних результатів і відповідність умов експерименту до основних положень прийнятих експериментальних методик;

• за результатами експерименту виявлено, що випробувані зразки залізобетонних плити мають межу вогнестійкості 50 хв, що дозволяє забезпечити клас вогнестійкості не менше REI 45;

• аналіз статистичних характеристик показників, отриманих у процесі проведення експерименту, показав їхню достатню достовірність та якість, оскільки середні значення відносного відхилення не перевищували 15 %;

• оцінювання адекватності за критерієм Фішера результатів математичного моделювання поведінки залізобетонних плит з використанням метода скінченних елементів вказує на те, що одержані результати розрахунку є адекватними з огляду на відсутність випадків перевищення розрахованого критерію Фішера відповідного табличного значення.

## РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНКОВЕ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОРОЖНИСТИХ ПЛИТ ЗА НАСТАННЯМ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ВТРАТИ ЦІЛІСНОСТІ

### 4.1. Уточнений метод прогнозування настання граничного стану втрати цілісності залізобетонних порожнистих плит в умовах впливу пожежі

Для визначення моменту настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонних порожнистих плит в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою розрахункового підходу можна застосувати спрощений підхід, що базується на певних припущеннях.

Для формулювання цих припущень необхідно дослідити закономірності та основні механізми настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

Для цього можуть бути використані експериментальний або розрахунковотеоретичний підхід. Використання експериментального підходу є ускладненним, як це було описано у першому розділі цієї роботи. За таких умов перспективним є застосування розрахункового підходу, тобто використання універсальних математичних моделей, що мають у своїй основі загальні закони механіки деформованого тіла та феноменологію поведінки залізобетону в умовах термосилового впливу пожежі. У такому разі мають бути використані диференціальні рівняння напружено-деформованого стану деформованого твердого тіла, апроксимовані з використанням методу скінченних елементів.

Застосувавши такий підхід, використавши дані, отримані на основі математичного моделювання, описаного у другому розділі цієї роботи, можна сформулювати положення, що дозволять сформувати спрощений підхід до цієї проблеми.

### 4.1.1. Математична модель напружено-деформованого стану у залізобетонних порожнистих плитах в умовах впливу пожежі

Для розробки математичної моделі, що описує напружено-деформований стан (НДС) залізобетонних порожнистих плит за результатами досліджень, наведених у [36, 227–234, 264–282], може бути застосований універсальний розрахунково-теоретичний підхід, який має у своїй основі наступні положення.

1. У якості базової математичної моделі, яка описує напруженодеформований стан у залізобетонних порожнистих плитах під час пожежі, застосовується загальна система диференціальних рівнянь НДС механіки твердого тіла, яка інтегрується із залученням МСЕ.

2. Процес поширення тепла у внутрішніх шарах залізобетонних порожнистих плит відбувається тільки у їхній бетонній основі з огляду на велику різницю теплопровідностей бетону та арматурної сталі.

3. Механічні характеристики бетону та арматурної сталі залежать від деформації СЕ, що визначаються зміщеннями вузлів, нелінійно, і при цьому мають бути враховані великі деформації залізобетонних порожнистих плит, такі що можуть бути порівняні з їхніми габаритними розмірами.

4. Базова система диференціальних рівнянь, що описує НДС інтегрується за допомогою числового методу скінченних елементів із залученням ітеративного методу Ньютона-Рафсона для лінеаризації диференціальних рівнянь, шляхом покрокового прикладання наявного механічного навантаження до фіксування ознак руйнування досліджуваних залізобетонних плит.

5. Для обчислення параметрів НДС у залізобетонних порожнистих плитах під час теплового впливу пожежі враховується феноменологія поведінки бетону та арматурної сталі під час нагрівання з використанням повних несиметричних діаграм деформування із спадною гілкою.

6. Феноменологія поведінки бетону та арматурної сталі також враховується при відповідної модифікації матриць, що описують поведінку матеріалів з врахуванням появи пластичних деформацій та тріщин у вузлах СЕ.

7. Ознаками повного руйнування досліджуваних залізобетонних порожнистих плит є:

• поява розбіжності ітеративного процесу обчислення внаслідок втрати геометричної незмінності системи;

• поява граничних величин пластичних деформацій у вузлах СЕ моделі залізобетонних порожнистих плит;

• фіксації критичних значень швидкості нарощення глобальних переміщень точок СЕ моделі залізобетонних порожнистих плит.

Математична модель, яка описує НДС у залізобетонних порожнистих плитах під час теплового впливу пожежі та силового навантаження під час записування рівнянь має враховувати фізичну та геометричну не лінійність з огляду на рекомендації [36, 227–234, 264–282]. У такому разі інтегрування цієї системи диференціальних рівнянь задачі має виконуватися із врахуванням всіх особливостей поведінки матеріалів, які є компонентами залізобетону, а саме нелінійної залежності між деформаціями та напруженнями, виникненням пластичних деформацій, появою великих деформацій, появою місцевої втрати стійкості та ін. Це може бути досягнуто тільки за умови використання числових методів [36, 227-234, 264-282] інтегрування. До найбільш поширених числових методів апроксимації таких диференціальних рівнянь у разі їх інтегрування можна віднести МСЕ. Передумовою для цього є широка універсальність та надійність відпрацьованих числових алгоритмів, реалізованих добре за допомогою програмних та апаратних засобів обчислювальної техніки. На доданок до цього, застосування такого підходу дає змогу реалізовувати математичні моделі деградації механічних властивостей бетону та арматурної сталі під впливом пожежі, а також надійних та продуктивних числових ітеративних алгоритмів обчислення великих деформацій [36, 227-234, 247-259, 264-282]. Враховуючи такі міркування, апроксимація диференціальних рівнянь НДС у залізобетонних порожнистих плитах під час теплового впливу пожежі за відповідними сітковими моделями для дискретизації розрахункової області застосовується МСЕ, при

застосуванні записується загальна система рівнянь рівноваги певного СЕ у локальній системі координат у вигляді [36, 227–234, 247–259, 264–282]:

$$[\mathbf{K}_{e}] \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}_{e}\}^{nd} + \{\mathbf{F}_{e}\}^{pr} + \{\mathbf{F}_{e}\}^{th},$$
(4.1)

де [**K**<sub>e</sub>] – матриця жорсткості окремого СЕ, що записується за допомогою виразу:

$$[\mathbf{K}_{\mathrm{e}}] = \int_{V} \mathbf{B}^{\mathrm{T}} \mathbf{E} \mathbf{B} \,\mathrm{d}V, \qquad (4.2)$$

де  $\{\mathbf{F}_{e}\}^{nd}$  – вектор сил у вузлах даного CE;

 $\{\mathbf{F}_{e}\}^{pr}$  – вектор розподілених сил, що діють в СЕ. Означений вектор визначається з використанням наступної формули:

$$\{\mathbf{F}_{e}\}^{pr} = \int_{S} \left[\mathbf{N}_{n}\right]^{T} \{\mathbf{P}\} dS, \qquad (4.3)$$

де  $\{\mathbf{F}_e\}^{th}$  – вектор вузлових силових факторів від нагрівання, що описується за формулою:

$$\{\mathbf{F}_{\mathbf{e}}\}^{\mathrm{th}} = \int_{V} \mathbf{B}^{\mathrm{T}} \mathbf{E} \{\mathbf{\epsilon}^{\mathrm{th}}\} \mathrm{d}V, \qquad (4.4)$$

де {**u**} – вектор вузлових переміщень CE;

 $\{ \boldsymbol{\epsilon}^{th} \}$  – вектор вузлових температурних деформацій CE.

Вирази (4.2) – (4.4) містять символ B, який відповідає матриці деформацій вузлів СЕ. Елементи цієї матриці обчислюються з використанням формули B = D[N]. Позначення [N] та [N<sub>n</sub>] у записаних рівняннях відповідають матриці інтерполяційних функцій в об'ємі заданого СЕ та інтерполяційних функцій по його грані, де прикладаються розподілені навантаження. У разі, якщо параметри, які є елементами матриці жорсткості, що входить до рівняння (4.1), є обчисленими, можна використати означене рівняння для обчислення переміщень вузлів СЕ {u}, а потім, використовуючи отримані результати, за допомогою матриці інтерполяційних функцій, визначити внутрішні вузлові переміщення СЕ. При здійсненні обчислень напружень за отриманими внутрішніми вузловими переміщеннями СЕ застосовується такий вираз:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \left( \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}_{t} \right) + \boldsymbol{\sigma}_{0}, \qquad (4.5)$$

де Е – модуль пружності (модуль Юнга);

*є* – механічна деформація (від зовнішнього навантаження);

 $\varepsilon_t$  – температурна деформація (викликана зміною температури);

 $\sigma_0$  – початкові (залишкові) напруження.

При об'єднанні всіх СЕ у сукупний ансамбль для розв'язання поставленої розрахунку міцності дискретизованій розрахунковій області задачі y залізобетонної порожнистої плити за скінченних елементів. метолом використовується такий вираз [36, 227-234, 247-259, 264-282]:

$$[K] \{q\} = \{p\};$$
(4.6)

де [K] – загальна матриця жорсткості системи скінченних елементів, що складається з матриць жорсткості, сформованих для кожного окремого елемента; {q} – загальний вектор вузлових переміщень, який включає суми векторів вузлових переміщень кожного CE;

{ **p** } – вектор сил, складений для кожного CE на основі сумарних сил, що діють у кожному CE.

Нелінійна поведінка матеріалів, які є компонентами залізобетону, враховується шляхом запису матриць пружності СЕ у загальному вигляді [36, 227–234, 247–259, 264–282]:

$$\mathbf{E} = \frac{E(\theta)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{pmatrix},$$
(4.7)

де *E*(*θ*) и *v* – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона. Модуль пружності, враховує деградацію матеріалу шляхом уведення його зниження під впливом температури.

Математична модель, що враховує фізичну нелінійність деформування матеріалів, що є компонентами залізобетону, має у свої основі розв'язок задачі розрахунку пластичних деформацій і відповідних їм напружень. При даному підході до розрахунку використовується спеціальний критерій, який встановлює еквівалентність загального напруженого стану до одноосного, який обґрунтований як результат широкого експериментального досвіду. За таких умов величини пластичних деформацій у вузлах СЕ і еквівалентних їм напружень при розгляді НДС цієї залізобетонної порожнистої плити розраховуються шляхом застосування теорії пластичного деформування матеріалів, які є компонентами залізобетону. У процесі обчислення параметрів НДС залізобетонної порожнистої плити під час теплового впливу пожежі при врахуванні пластичних деформацій бетону та арматурної сталі при використанні МСЕ здійснюються обчислювальні операції, описані нижче [36, 227–234, 247–259, 264–282].

1. За параметрами поточного кроку інтегрування за часом записаних рівнянь розраховуються значення напружень з урахуванням пластичних деформацій у бетоні та арматурній сталі, які виникли за нормальних температур згідно із діаграмами деформування бетону та арматурної сталі.

2. На наступному кроці обчислюються відповідні напруження за показниками тільки пружних деформацій {ε<sup>tr</sup>}, отриманих у результаті
розрахунків на попередньому кроці навантаження з використанням формули:

$$\{\boldsymbol{\sigma}^{tr}\} = \mathbf{E} \{\boldsymbol{\varepsilon}^{tr}\}. \tag{4.8}$$

3. За розрахованими величинами діючих напружень на поточному кроці інтегрування обчислюються еквівалентні напруження із залученням однієї з моделей текучості матеріалів, що є компонентами залізобетону. Було прийнято для застосування багатошарову математичну модель Бесселинга [36, 227-234, 247-259, 264-282] асоціативної теорії пластичності матеріалів із пружними та пластичними властивостями. Такий підхід враховує використання повних діаграм деформування бетону та арматурної сталі, що розбиваються на окремі ділянки і апроксимуються прямими лініями з відповідним кутом нахилу. СЕ в цьому разі розбиваються на окремі шари, де характеристики НДС мають бути узгоджені із поточною ділянкою діаграми деформування відповідного матеріалу, також вводиться припущення, що деформація отриманих шарів є однаковою. Співвідношення величин характеристик НДС одержаних шарів обчислюються із використанням вагових коефіцієнтів. Еквівалентні напруження y CE розраховуються з використанням формули:

$$\sigma_{\rm e} = [3/2 \{s\}^{\rm T} [M] \{s\}]^{1/2}, \qquad (4.9)$$

де {s} – вектор девіатора напружень, який розраховується за формулою:

$$\{s\} = \{\sigma\} - \sigma_m (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^{\mathrm{T}}, \tag{4.10}$$

де  $\sigma_m$  – усереднене нормальне напруження, яке обчислюється за виразом:

$$\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3. \tag{4.11}$$

У виразі (4.9) [М] – матриця, що має таку форму:

За умови, коли обчислене еквівалентне напруження більше за границю текучості відповідного матеріалу, здійснюється операція розрахунку пластичного узгоджувального множника λ із залученням спеціальних ітераційних процедур, що відповідають методу Ньютона-Рафсона за допомогою формул:

$$\lambda = \frac{\left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\}^{\mathrm{T}} [\mathbf{M}] \mathbf{E} \{d\varepsilon\}}{-\left\{\frac{\partial F}{\partial \chi}\right\} [\sigma]^{\mathrm{T}} [\mathbf{M}] \left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\} + \left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\}^{\mathrm{T}} [\mathbf{M}] \mathbf{E} \left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\}}, \quad \left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\} = \left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\} = \frac{3\{s\}}{2\sigma_{\mathrm{e}}}$$
(4.13)

де ∂F – похідна функції поверхні текучості за напруженнями.

 $[M]E{\delta\epsilon}$  –прирост деформації;

 $\left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\}$  –градієнт потенціалу плинності (пластичного потенціалу).

σ<sup>т</sup>М – зв'язок напружень з тензорними характеристиками матеріалу.

s – девіатор напружень,  $\sigma_e$  – еквівалентне напруження.

4. Розраховується вектор модифікації пластичних деформацій за формулою:

$$\varepsilon'^{pl} = \lambda' \frac{\partial Q}{\partial \sigma}, \qquad (4.14)$$

де *Q* – потенціал пластичної деформації, який обмежується об'ємною поверхнею, що відповідає циліндру фон Мізеса під час стиску.

Цей циліндр модифікованій з урахуванням величини пластичного коефіцієнта Пуассона під час розтягу. Ця поверхня описується за допомогою формул:

$$Q = \sigma_e - \sigma_c$$
 при  $\sigma_m < \sigma_c/3$ ,  $Q = (\sigma_m - Q)^2/c^2 + \sigma_e^2 = 9Q^2$  при  $\sigma_m \ge \sigma_c/3$ . (4.15)

У цих формулах коефіцієнт с має розраховуватися за виразом:

$$c = \sqrt{\frac{9(1 - 2\nu^{pl})}{5 + 2\nu^{pl}}},$$
(4.16)

де *v<sup>pl</sup>* – пластичний коефіцієнт Пуассона.

5. На наступному етапі мають бути розраховані вектори повних пружних і пластичних деформацій, а також напружень, що відповідають їм. При цьому використовуються відповідні формули:

$$\{\varepsilon_n^{pl}\} = \{\varepsilon_{n-1}^{pl}\} + \{\Delta\varepsilon^{pl}\}, \{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon^{tr}\} - \{\Delta\varepsilon^{pl}\}, \{\sigma\} = E\{\varepsilon^{el}\}.$$
(4.17)

6. З використанням значень отриманих деформацій розраховується прирощення і поточне значення роботи пластичних деформацій:

$$\Delta \chi = \{\sigma\}^{\mathrm{T}} \{\Delta \varepsilon^{pl}\}, \, \chi_n = \chi_{n-1} + \Delta \chi.$$
(4.18)

Тут індекс *n* визначає номер поточного та попереднього часового шару.

Під час виконання цього алгоритму відповідно до моделі кінетичного зміцнення встановлюється критерій настання пластичних деформацій, що розраховується за формулою:

$$\mathbf{F} = [3/2 (\{s\} - \{\alpha\})^{\mathrm{T}} [\mathbf{M}] (\{s\} - \{\alpha\})]^{1/2} - \sigma_{k},$$
(4.19)

де σ<sub>k</sub> – поточні напруження, відповідні до даної пластичної деформації;

{а} – вектор зміщення поверхні текучості, яку визначають з використанням формул:

$$\{\alpha\} = 2G\{\epsilon^{sh}\}; \ \{\epsilon_n^{sh}\} = \{\epsilon_{n-1}^{sh}\} + \{\Delta\epsilon^{sh}\};$$
(4.20)

$$\left\{\Delta\varepsilon^{sh}\right\} = \frac{2EE_T}{3G(E - E_T)} \left\{\Delta\varepsilon^{pl}\right\},\tag{4.21}$$

де *G* – модуль зсуву.

Утворення тріщин у розтягнутих шарах є характерним явищем для бетону, оскільки він має велику різницю при роботі на стиск та розтяг [36, 227–234, 247– 259, 264–282]. Наявність арматури не дає тріщинам розвиватися, але їхня поява приводить до неоднорідності механічних властивостей бетону. Це пояснюється тим, що шар бетону із тріщинами зберігає свою здатність до опору нормальним напруженням, які діють у площині, паралельній до берегів тріщини, нормальним напруженням, що намагаються стиснути береги тріщини, а також дотичним напруженням, діючим перпендикулярно площині тріщини і, частково, діючим у площині тріщини. Тому з'являється необхідність визначати положення шарів із появою тріщин і модифікувати матрицю механічних властивостей бетону.

Згідно із роботами [36, 227–234, 247–259, 264–282] критерій руйнування бетону при складному напруженому стані може бути виражений наступним чином:

$$F/f_c - B \ge 0, \tag{4.22}$$

де  $F - \phi$ ункція стану головних напружень ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ );

Якщо умова (4.22) не виконується, то утворення тріщин не виникає. В цьому разі всі напружені стани обмежуються певною поверхнею *B*, яка визначається трьома головними напруженнями і п'ятьма характеристиками міцності  $f_c$ ,  $f_{cc}$ ,  $f_{cct}$  и  $f_{ct\sigma}$ .

Для описання деформування бетону із тріщинами застосовувалася теорія

міцності бетону Willam и Warnke [36, 245, 246]. Згідно із цією теорією міцності поверхня руйнування може бути задана з використання величин границь міцності на стиск та на розтяг  $f_c$ ,  $f_{ct}$ , всі інші характеристики міцності можна визначити за формулами:

$$f_{cct} = 1,2 f_c, f_{ct\sigma} = 1.45 f_c, f_{cc} = 1,725 f_c.$$
(4.23)

Критерій міцності (4.22) є складеним, і поверхня руйнування будується на основі розгляду чотирьох можливих варіантів руйнування бетону з утворенням тріщини.

У випадку напруженого стану  $0 \ge \sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$  (всебічне стискання) критерії *F* і *B* обчислюються із використанням виразів:

$$F_{1} = \frac{1}{\sqrt{15}} \sqrt{(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{1} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2}},$$

$$B_{1} = \frac{2r_{1}(r_{2}^{2} - r_{1}^{2})\cos\eta + r_{2}(2r_{1} - r_{2})[4r_{1}(r_{2}^{2} - r_{1}^{2})\cos^{2}\eta + 5r_{1}^{2} - 4r_{1}r_{2}]^{\frac{1}{2}}}{4r_{1}(r_{2}^{2} - r_{1}^{2})\cos^{2}\eta + (2r_{1} - r_{2})^{2}},$$

$$cos \eta = \frac{2\sigma_{1} - \sigma_{2} - \sigma_{3}}{\sqrt{2}((\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{1} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2})^{\frac{1}{2}}},$$

$$r_{1} = a_{0} + a_{1}\xi + a_{2}\xi^{2}, r_{2} = b_{0} + b_{1}\xi + b_{2}\xi^{2}, \xi = \sigma_{m}/f_{c}.$$
(4.24)

Параметри *a*<sub>0</sub>, *a*<sub>1</sub>, *a*<sub>2</sub>, *b*<sub>0</sub>, *b*<sub>1</sub> и *b*<sub>2</sub>, які входять до формул (4.24), розраховуються під час розв'язання систем рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{F_{1}}{f_{c}}(\sigma_{1} = f_{ct}, \sigma_{2} = \sigma_{3} = 0) \\ \frac{F_{1}}{f_{c}}(\sigma_{1} = 0, \sigma_{2} = \sigma_{3} = -f_{cct}) \\ \frac{F_{1}}{f_{c}}(\sigma_{1} = -\sigma_{m}, \sigma_{2} = \sigma_{3} = -\sigma_{m} - f_{ct\sigma}) \end{cases} = \begin{pmatrix} 1 & \xi_{t} & \xi_{t}^{2} \\ 1 & \xi_{cb} & \xi_{cb}^{2} \\ 1 & \xi_{1} & \xi_{1}^{2} \end{pmatrix} \begin{vmatrix} a_{0} \\ a_{1} \\ a_{2} \end{vmatrix},$$

$$(4.25)$$

$$\xi_{t} = f_{ct}/3f_{c}, \ \xi_{cb} = -2f_{cct}/3f_{c}, \ \xi_{1} = -\sigma_{m}/f_{c} - 2f_{ct\sigma}/3f_{c}$$

$$\begin{cases} \frac{F_{1}}{f_{c}} (\sigma_{1} = \sigma_{2} = 0, \sigma_{3} = -f_{c}) \\ \frac{F_{1}}{f_{c}} (\sigma_{1} = \sigma_{2} = -\sigma_{m}, \sigma_{3} = -\sigma_{3} - f_{cc}) \\ \frac{F_{1}}{f_{c}} (\sigma_{1} = \sigma_{2} = \sigma_{3} = 0) \end{cases} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{3} & \frac{1}{9} \\ 1 & \xi_{2} & \xi_{2}^{2} \\ 1 & \xi_{0} & \xi_{0}^{2} \end{pmatrix} \begin{vmatrix} b_{0} \\ b_{1} \\ b_{2} \end{vmatrix},$$

$$(4.26)$$

$$\xi_{2} = -\sigma_{m}/f_{c} - f_{cc}/3f_{c}.$$

Параметр  $\xi_0 \epsilon$  додатнім коренем рівняння:

$$r_2(\xi_2) = a_0 + a_1\xi_0 + a_2\xi_0^2. \tag{4.27}$$

З огляду на те, що поверхня руйнування має залишатися опуклою, відношення  $r_1/r_2$  повинно бути у діапазоні  $0.5 < r_1/r_2 < 1.25$ . Коефіцієнти  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  мають відповідати таким умовам [36, 247, 248]:

$$a_0 > 0, a_1 \le 0, a_2 \le 0, b_0 > 0, b_1 \le 0, b_2 \le 0.$$
 (4.28)

Таким чином, поверхня руйнування залишається замкненою і може бути здатною ідентифікувати руйнування при високому середньому напруженні (ξ > ξ<sub>2</sub>).

У разі випадку напруженого стану  $\sigma_1 \ge 0 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$  (розтяг – стиск – стиск) критерії *F* і *B* визначаються за формулами:

$$F_{2} = \frac{1}{\sqrt{15}} \sqrt{(\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + \sigma_{2}^{2} + \sigma_{3}^{2}},$$

$$B_{2} = \frac{2p_{1}(p_{2}^{2} - p_{1}^{2})\cos\eta + p_{2}(2p_{1} - p_{2})[4p_{1}(p_{2}^{2} - p_{1}^{2})\cos^{2}\eta + 5p_{1}^{2} - 4p_{1}p_{2}]^{1/2}}{4p_{1}(p_{2}^{2} - p_{1}^{2})\cos^{2}\eta + (2p_{1} - p_{2})^{2}}, \quad (4.29)$$

$$p_1 = a_0 + a_1 \zeta + a_2 \zeta^2, p_2 = b_0 + b_1 \zeta + b_2 \zeta^2, \xi = 1/3(\sigma_2 + \sigma_3).$$

Коефіцієнти  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  і  $b_2$  обчислюються у результаті розв'язання систем рівнянь (4.24) – (4.26).

За умови виконання цього критерію утворення тріщин відбувається у площині, перпендикулярній головному напруженню *о*<sub>1</sub>.

У випадку напруженого стану  $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge 0 \ge \sigma_3$  (розтяг – розтяг – стиск) критерії *F* і *B* розраховуються за виразами:

$$F_3 = \sigma_i; (i = 1, 2), B_3 = (f_{ct}/f_c)(1 + \sigma_3/B_2(\sigma_i, 0, \sigma_3)), i = 1, 2.$$
(4.30)

Якщо критерій руйнування виконується для кожного значення i = 1, 2, тоді утворення тріщин відбувається у площині, перпендикулярній головним напруженням  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Якщо критерій руйнування задовольняється тільки при i = 1, утворення тріщин відбувається в площині, перпендикулярній головному напруженню  $\sigma_1$ .

У випадку напруженого стану  $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3 \ge 0$  (розтяг – розтяг – розтяг) критерії *F* і *B* обчислюються за виразами:

$$F_4 = \sigma_i; (i = 1, 2, 3), B_4 = f_{ct}/f_c.$$
(4.31)

Якщо умова руйнування виконується для направлень 1, 2 і 3, тоді утворення тріщин відбувається у площинах, перпендикулярних головним напруженням  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  і  $\sigma_3$ . Якщо умова руйнування виконується для направлень 1 і 2, утворення тріщин відбувається у площинах, перпендикулярних головним напруженням  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ . Якщо умова руйнування виконується для направлення 1, розтріскування бетону відбувається у площині, перпендикулярній головному напруженню  $\sigma_1$ . Обчислення за таким алгоритмом здійснюються тільки у точках интегрування або в узлах СЕ.

За наявності відкритої тріщини в точках інтегрування СЕ матриця Е модифікується за рахунок введення площин послаблення перпендикулярно

поверхні тріщини. Також вводиться коефіцієнт  $\beta_t$  передачі дотичних напружень через береги відкритої тріщини, що описує взаємне ковзання берегів тріщини.

Якщо в точці інтегрування з'явилася тріщина в одному напрямку, матриця Е<sub>ck</sub> записується у такому вигляді:

$$\mathbf{E}_{ck} = \frac{E(\theta)}{(1+\nu)} \begin{pmatrix} \frac{R_t(1-\nu)}{E(T)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{pmatrix}.$$
(4.32)

Індекс *ck* означає, що матриця побудована для локальної системи координат, осі якої збігаються з осями головного напруження, а її вісь  $x_{ck}$  перпендикулярна площині тріщини.  $R_t$  – адаптивний параметр, що вводиться для поліпшення збіжності обчислювального процесу і дорівнює  $R_t = 0.6$ .

Якщо тріщини в одному або більше напрямках є закритими, для цього випадку вводиться коефіцієнт передачі дотичних напружень через їхні береги, а матриця властивостей записується в такому вигляді:

$$E_{ck} = \frac{E(\theta)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_t \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_t \frac{(1-2\nu)}{2} \end{pmatrix}.$$
 (4.33)

Якщо з'явилася відкрита тріщина у двох чи трьох напрямках, матриця  $E_{ck}$  записується у вигляді:

Трансформація матриці для локальної системи координат СЕ здійснюється за такою формулою:

$$\mathbf{E} = [\mathbf{T}_{ck}]^{\mathrm{T}} \mathbf{E}_{ck} [\mathbf{T}_{ck}], \qquad (4.35)$$

де [T<sub>ck</sub>] – матриця переходу між двома системами координат є інструментом, що дозволяє виразити вектори однієї системи через вектори іншої.

Деформація бетону із тріщиною записується залежно від виду утвореної тріщини:

$$\varepsilon_{ck} = \varepsilon_x^{ck} + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_y^{ck} + \varepsilon_z^{ck}$$
 за відсутності тріщин;  

$$\varepsilon_{ck} = \varepsilon_x^{ck} + \nu \varepsilon_z^{ck}$$
 за наявності однієї тріщини у напрямку осі у;  

$$\varepsilon_{ck} = \varepsilon_x^{ck}$$
, за наявності двох тріщин у напрямках по осях у та z.  
(4.36)

Де  $\varepsilon_x^{ck}$ ,  $\varepsilon_y^{ck}$ ,  $\varepsilon_z^{ck}$  – компоненти вектора деформацій  $\{\varepsilon^{ck}\}$  у вузлах СЕ із тріщинами, що визначаються за такою загальною формулою:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}^{ck}\} = [\mathbf{T}_{ck}] \{\boldsymbol{\varepsilon}'\},\tag{4.37}$$

226

де  $\{\varepsilon'\}$  – вектор повної деформації в СЕ на даному етапі навантаження, що визначається з виразу:

$$\{\varepsilon_n'\} = \{\varepsilon_{n-1}^{el}\} - \{\Delta\varepsilon_n\} - \{\Delta\varepsilon_n^{th}\} - \{\Delta\varepsilon_n^{pl}\}.$$
(4.38)

Тут  $\left\{ \varepsilon_{n-1}^{el} \right\}$  – пружна деформація на попередньому етапі навантаження;

 $\{\Delta \varepsilon_n\}$  – повне прирощення пружної деформації на поточному етапі навантаження;  $\{\Delta \varepsilon_n^{th}\}$  – прирощення температурної деформації на поточному етапі навантаження;  $\{\Delta \varepsilon_n^{pl}\}$  – прирощення пластичної деформації на поточному етапі навантаження.

Якщо вектор {ε<sub>ck</sub>} більше 0, тріщина вважається відкритою, якщо ні, – тоді закритою.

При вирішенні системи роздільних рівнянь МСЕ (4.1) – (4.5) з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей застосовується ітераційна процедура методу Ньютона-Рафсона. Для реалізації ітераційного процесу при даних видах нелінійностей основні роздільні рівняння МСЕ записуються в інкрементальній постановці:

$$[\mathbf{K}(\{\mathbf{q}_n\})] \{\Delta \mathbf{q}\} - \{\mathbf{p}(\{\mathbf{q}_n\})\} = 0.$$
(4.39)

Це означає, що навантаження прикладається не відразу, а в кілька кроків. У цьому випадку дуже зручним є параметр часу, який фіксує поточний стан прикладених навантажень та деформацій, які вони викликали. Ітераційний процес можна записати у вигляді такого виразу:

$$\{q_{n+1}\} = \{q_n\} + [K(\{q_n\})]^{-1} \{\delta \mathbf{p}\}.$$
(4.40)

Графічно цей процес може бути представлений схемою, поданою на рис. 4.1



Рис. 4.1. Графічне представлення ітераційних процедур методу Ньютона-Рафсона, що використовуються.

Таким чином, процес обчислення триває доти, поки не буде досягнуто прийнятної точності шуканого розв'язання.

# 4.2. Початкові дані та основні розрахункові схеми залізобетонної порожнистої плити

Для визначення моменту настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності досліджується залізобетонна порожниста плита, конструктивна схема якої наведена на рис. 2.10.

Основні характеристики бетону й арматурної сталі наведені у п. 2.9.2. Для врахування їхніх деформативних характеристик використовуються діаграми «деформації-напруження», що рекомендовані у другій частині Єврокоду 2 [15].

Для побудування даних діаграм використовуються співвідношення, наведені у табл. 4.1.

### Таблиця 4.1

Напруження у бетоні, МПа;	Напруження в арматурі, МПа;
граничні деформації бетону	граничні деформації арматурної сталі
	при $0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s0}\sigma_s = E_{s,\theta}\varepsilon_s,$
	при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \sigma_s = f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy} - c)]$
при $0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,\theta},$ $\sigma(\varepsilon) = \frac{3\varepsilon_c f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,T} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)},$	$\left(\varepsilon_{s}\right)^{2}]^{0,5},$
	при $\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st} \sigma_s = f_{s,\theta}$ ,
	при $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2} \sigma_s = f_{s,\theta} \left[1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st})/(\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})\right]$
	$[\varepsilon_{st})],$
при $\mathcal{E}_{c1,\theta}$ < $\mathcal{E}_{c}$ < $\mathcal{E}_{c2}$	при $\varepsilon_{s2} < \varepsilon_s \ \sigma_s = 0,$
$\sigma(\varepsilon) = f_{c,\theta} - \frac{f_{c,\theta}(\varepsilon_c - \varepsilon_{c1,\theta})}{\sigma(\varepsilon_c - \varepsilon_{c1,\theta})}.$	$a^{2} = (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp} + c/E_{s,\theta}), b^{2} = c(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})$
$\mathcal{E}_{c2} - \mathcal{E}_{c1,\theta}$	$(\varepsilon_{sp})E_{s,\theta}+c^2,$
	$\mathcal{C} = rac{ig(f_{s, heta} - f_{sp, heta}ig)^2}{ig(arepsilon_{sy} - arepsilon_{sp}ig) E_{s, heta} - 2ig(f_{s, heta} - f_{sp, heta}ig)}.$

Механічні характеристики бетону й арматури

У табл. 4.1 у формули входять такі параметри:

 $\varepsilon_c$  – відносна деформація бетону;

*f<sub>c,θ</sub>* – розрахунковий опір бетону стисканню, що залежить від температури нагрівання шару бетону;

 $\varepsilon_{c1,\theta}$  – відносна деформація, до якої справедливе пропорційне співвідношення між деформацією та напруженням;

*Е*<sub>c2</sub> – гранична відносна деформація;

*є*<sub>*s*</sub> – відносна деформація сталі;

 $\varepsilon_{sy}$  – деформація, через яку настає границя текучості;

 $\varepsilon_{st}$  – деформація, при якій починається спадна гілка діаграми;

*f<sub>sp,θ</sub>* – границя пропорційності арматурної сталі;

*Е*<sub>*s*,*θ*</sub> – модуль пружності сталі, залежний від температури нагріввання.

Використовуючи співвідношення, наведені у табл. 4.1, були побудовані відповідні діаграми деформування бетону та арматурної сталі. Побудовані діаграми подані на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Діаграми деформування матеріалі, що є компонентами залізобетону порожнистої плити: *а* – бетону; *б* – арматурної сталі

На рис. 4.3 наведена схема фрагмента плити із прикладеним розподіленим навантаженням до її верхньої поверхні [247, 248].



Рис. 4.3. Схема прикладання навантаження до фрагмента залізобетонної плити

На рис. 4.3 на зображеній схемі фрагмента плити у вигляді половини її однієї трубоподібної секції, де також показані нерухомі опорні поверхні, які є твердими тілами, що обумовлюється прийнятим матеріалом.

фрагмента залізобетонної порожнистої плити на такі опори Спирання злійснюється шляхом моделювання контактної взаємодії між окремими частинами моделі конструкції, автоматично створеними в системі як частини з різного матеріалу. Контактна взаємодія встановлена автоматична, типу «поверхня-поверхня», з урахуванням тертя між ними за узагальненим законом Кулона з коефіцієнтом тертя  $\mu = 0.6$  (тертя між сталевою поверхнею та поверхнею бетону).

Згідно із рекомендаціями [15] статичні задачі моделювання НДС залізобетонних плит у разі одностороннього впливу на них пожежі зі стандартним температурним режимом вирішувалися з поетапним відтворенням історії навантаження у дві стадії.

На першій стадії моделювалося – прикладання діючого навантаження. На другій стадії як навантаження прикладалися розподіл температури до вузлів СЕ конструкції.

При виборі СЕ для моделі плити були прийняті такі основні положення [247, 248].

1. Для моделювання бетону фрагмента залізобетонної порожнистої плити й абсолютно твердих опор використовується 8-вузловий гексаедричний СЕ типу SOLID, для моделювання сталевої арматури 2-вузловий стрижневий СЕ типу LINK.

2. Всі типи СЕ є фізично нелінійними, їхні властивості відповідають моделям нелінійної поведінки матеріалів, описаних у п. 4.1 та п. 4.2 цього розділу.

На рис. 4.4 показаний загальний вигляд скінченно-елементної схеми фрагмента залізобетонної плити, що є відповідно розрахунковою областю [247, 248].

Як видно на скінченно-елементній схемі, наведеній на рис. 4.4 сітка СЕ бетону й арматурного каркаса не має дуже великої густини.



Рис. 4.4. Скінченно-елементна схема фрагмента залізобетонної порожнистої плити із опорними поверхнями.

Розміри та кількість CE у схемі залізобетонної порожнистої плити наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Частина моделі	Мін. розмір, мм	Макс. розмір, мм	Кількість
Бетонна основа	25	100	918
Арматура	100	100	58
Опори	25	250	8
Загальна кількість скінченних елементів:			984

Параметри скінченних елементів моделей зразків для випробування

Параметри, які визначають густоту сітки, обрані для забезпечення доброї збіжності обчислювального процесу.

## 4.3. Результати розрахунку за уточненим методом прогнозування настання граничного стану втрати цілісності залізобетонних порожнистих плит в умовах впливу пожежі

Використовуючи результати розв'язання теплотехнічної задачі, які подані у

п. 2.9.5, було проведено розрахунок параметрів НДС залізобетонної порожнистої плити за підходом, що був описаний вище. У результаті був отриманий набір даних [247, 248], що підлягає інтерпретації для встановлення аспектів та закономірностей настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонної порожнистої плити під час теплового впливу пожежі. Для початку був проведений аналіз адекватності отриманих результатів шляхом їхнього порівняння із експериментальними даними [246 – 248]. На рис. 4.5 подані графіки прогину, що було отримано у результаті розрахунку, а також у результаті експерименту.



Рис. 4.5. Графіки максимального прогину залізобетонної плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі: *1* – отриманий експериментально; *2* – отриманий у результаті розрахунку.

Графіки на рис. 4.5 мають добру збіжність, похибка результатів розрахунку відносно експериментальних даних не перевищує 4 %. Це показує, що отримані результати є достатньо адекватними і можуть бути використані для подальшого аналізу.

Одним із перспективних параметрів для оцінювання можливості утворення наскрізних дефектів у залізобетонних порожнистих плитах є їх наявність, яку можна інтерпретувати як настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності [247, 248]. З метою цього аналізу були побудовані розподіли

величини еквівалентної пластичної деформації по простору бетонної основи залізобетонної порожнистої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі. На рис. 4.6 показані побудовані розподіли пластичної деформації.



Рис. 4.6. Розподіли величини еквівалентної пластичної деформації по простору бетонної основи залізобетонної порожнистої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: a - 30 хв;  $\delta - 45$  хв; b - 55 хв

Аналізуючи розподіли пластичних деформацій, можна побачити, що за ними ідентифікувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності не представляється можливим, оскільки найбільші пластичні деформації сконцентровані у нижній частині залізобетонної плити і свідчать про те, що там знаходиться зосередження тріщин і дефектів, що загалом зрозуміло. Однак це не свідчать про те, що є порушення цілісності у верхній частині. Ще одним параметром, що дозволяє проаналізувати можливість настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, є розподілення «тріщин» [247, 248], настання яких ідентифікується у точках інтегрування, при застосуванні теорії міцності. На рис. 4.7 показані отримані розподілення тріщин у різні моменту часу.



Рис. 4.7. Розподіл тріщин у бетоні залізобетонної порожнистої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: a - 2 хв;  $\delta - 46$  хв

Аналізуючи картини розподілів тріщин, що показані на рис. 4.7, можна зазначити, що опираючись тільки на ці розподіли неможливо однозначно ідентифікувати появу наскрізних тріщин, оскільки поява ушкодження в одній або декількох точках інтегрування не дозволяє зробити висновок, що тріщини будуть наскрізними. Такі тріщини відіграють роль ефективної характеристики, щоб адекватно описати поведінку залізобетону під час термосилового впливу пожежі.

Розшифровка позначень тріщин і дефектів у бетоні подана на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Умовні позначення тріщин у бетоні

Узагальнюючи розподіли ушкоджень за рекомендаціями [247, 248] приймається, що СЕ бетону є повністю зруйнованим і не враховується у загальному ансамблі скінченних елементів при описанні опору цим навантаженням. Тож можна розглянути видалення таких СЕ, як ще один критерій ідентифікації настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності за утворенням наскрізних тріщин [247, 248].

На рис. 4.9 показані положення вилучених зруйнованих СЕ з розрахункової схеми залізобетонної порожнистої плити.



Рис. 4.9 Положення вилучених зруйнованих CE з розрахункової схеми залізобетонної порожнистої плити в різні моменти впливу стандартного температурного режиму пожежі: a - 14 хв; 6 - 30 хв; e - 44 хв

Таким чином, можна зробити висновок, що описаний підхід до розрахунку є ефективним щодо оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Було визначено, що граничний стан втрати цілісності відбувається на 44 хв. впливу стандартного температурного режиму пожежі. Це збігається із експериментальними даними.

# 4.4. Спрощений метод прогнозування настання граничного стану втрати цілісності залізобетонних порожнистих плит в умовах впливу пожежі

Використовуючи підхід, який був описаний у 2-му розділі роботи, слід зазначити, що механізм утворення наскрізної тріщини у верхньому шарі залізобетонних порожнистих плит може бути пов'язаний із утворенням призми руйнування. У роботах [141, 148, 246–248, 284] зафіксовано такі явища. Цей механізм може бути проілюстрований на схемі, наведеній на рис. 4.10 [284].



Рис. 4.10. Схема до механізму утворення наскрізної тріщини, що пов'язана із настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності

Схема, зображена на рис. 4.11, є узагальненням результатів проведених розрахунків, описаних у 2-му розділі роботи [246], та експериментальних досліджень поданих у розділі 3. Ця схема дозволяє сформулювати основні положення для обґрунтування спрощеного методу прогнозування настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонних порожнистих плит під час пожежі. Таким чином, отримання основних математичних співвідношень метода базується на таких положеннях.

1. Утворення тріщини, що сполучає порожнину та простір над плитою, відбувається за геометричною схемою, яка включає суцільну частину призматичної форми кут при вершині якої становить  $\varphi_c = 61^\circ$ . Така призматична частина називається призмою руйнування [246].

2. Всі напруження, що спричиняють утворення тріщини, розташовані в одній площині, тобто напружений стан є плоским.

3. Умова утворення тріщини визначається однією з теорій міцності бетону.

4. Додаткова арматура у верхній частини залізобетонної порожнистої плити не впливає на умови утворення або поширення тріщини.

5. Наявність тріщин не впливає на поширення тепла у внутрішніх шарах плити.

6. Після утворення тріщини, що заходить у порожнину плити, фіксується настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.
 Для встановлення основних математичних співвідношень була побудована

розрахункова схема, зображена на рис. 4.11.



Рис. 4.11. Схема до механізму утворення наскрізної тріщини, що пов'язана із настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності

Для встановлення критерію міцності у поздовжньому перерізі залізобетонної порожнистої плити використовується теорія міцності, що описана у роботах [36, 247, 248, 284]. Критерій міцності у цьому випадку виражається рівнянням [247, 248, 284]:

$$f_{ct,\theta}^{3} - I_{1}f_{ct,\theta}^{2} + I_{2}f_{ct,\theta} - I_{3} = 0, \qquad (4.41)$$

де *I*<sub>1</sub>, *I*<sub>2</sub>, *I*<sub>3</sub> – перший, другий та третій інваріанти тензора напружень, що визначаються за виразами [199–201]:

$$I_{1} = \sigma_{x} + \sigma_{y} + \sigma_{z}, I_{2} = \sigma_{x}\sigma_{y} + \sigma_{y}\sigma_{z} + \sigma_{z}\sigma_{x} - \tau^{2}_{xy} - \tau^{2}_{yz} - \tau^{2}_{zx},$$

$$I_{3} = \sigma_{x}\sigma_{y}\sigma_{z} + 2\tau^{2}_{xy}\tau^{2}_{yz}\tau^{2}_{zx} - \sigma_{x}\tau^{2}_{xy} - \sigma_{y}\tau^{2}_{yz} - \sigma_{z}\tau^{2}_{zx},$$
(4.42)

де  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau^2_{zx}$  – компоненти тензора напружень.

З огляду на сформульовані припущення та розрахункову схему, що показана на рис. 4.11 можна записати, що окремі компоненти тензора напружень дорівнюють нулю.

$$\sigma_x = 0, \ \sigma_z = 0, \ \tau_{yz} = 0, \ \tau_{zx} = 0, \tag{4.43}$$

Тож критерій міцності може бути записаний через вираз:

$$f_{ct,\theta}^{2} + \sigma_{y} f_{ct,\theta} - \tau_{xy}^{2} = 0.$$
(4.44)

Напруження у рівнянні (4.44) обчислюються за формулами:

$$\sigma_{y} = \frac{F_{p} t g \varphi_{c}}{b_{s} h_{p}}, \ \tau_{xy} = \frac{F_{p}}{b_{s} h_{p}}, \tag{4.45}$$

де *b*<sub>s</sub> – ширина плити.

Підставляючи дані величини у рівняння (4.44) та вирішуючи його відносно граничної сили *F<sub>p</sub>*, було проаналізовано можливість утворення тріщини за механізмом, що відтворений на схемі рис. 4.11 [247, 248, 284].

Аналіз всіх можливих розв'язків рівняння (4.44) показав, що не існує дійсних коренів. Тож під час утворення тріщин діє інший механізм, який показаний на схемі (рис. 4.12) [247, 248, 284].



Рис. 4.12. Схема до механізму утворення поперечної наскрізної тріщини, що пов'язана із настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності

Відповідно до розрахункової схеми, зображеної на рис. 4.12 було складене рівняння рівноваги [247, 248, 284]:

$$F_{st}(h-w) + \frac{2}{3} \frac{F_c h_p}{\sin \varphi_c} = M_E, \qquad (4.46)$$

де  $M_E$  – діючий момент від прикладеного до плити розподіленого навантаження.

Сила у арматурному стержні та сила відриву бокової поверхні призми руйнування залізобетонної порожнистої плити визначається відповідно за формулами [247, 248, 284]:

$$F_{st} = f_{s,\theta} \frac{\pi \cdot d_s^2}{4}; \ F_c = \frac{f_{ct,\theta} h_p b_s}{2 \sin \varphi_c}.$$

$$(4.47)$$

З огляду на наведені вирази відстань від верхньої поверхні плити до точки початку утворення наскрізної тріщини можна визначити за формулою [247, 248, 284]:

$$h_{p} = \sqrt{\frac{3\sin^{2}\phi_{c}}{f_{ct,\theta}b_{s}}} \left(\frac{q_{E}l^{2}}{8} - f_{s,\theta}\frac{\pi \cdot d_{s}^{2}}{4}\right)} \le w_{c}.$$
(4.48)

Таким чином, використовуючи цю формулу можна визначити небезпеку утворення наскрізної тріщини. Умовою, коли утворення наскрізної тріщини є небезпечним, є перевищення відстані  $h_p$  відстані від верхньої поверхні плити до краю порожнини  $w_c$ .

Іншою імовірною передумовою настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності може бути утворення поздовжніх наскрізних тріщини між верхнім краєм порожнини та верхньою поверхнею плити. Утворення таких тріщин можна прослідкувати на рис. 3.27-а та рис. 4.9. Механізм утворення такого типу тріщин може бути проілюстрований схемою, поданою на рис. 4.13 [247, 248, 284].



Рис. 4.13. Схема до механізму утворення поздовжньої наскрізної тріщини, що пов'язана із настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

З огляду на розрахункову схему, яка наведена на рис. 4.13 можна записати рівняння рівноваги, що описує напружено-деформований стан у відповідних внутрішніх шарах залізобетонної плити [247, 248, 284]:

$$\sigma_{c,\theta} = \frac{F_{\theta}}{w_c l} \Big[ 1 - 6w_c^{-1} \big( h - 0.5w_c - y_c \big) \Big].$$
(4.49)

Тут сила, що діє внаслідок температурного розширення у нижніх шарах фрагмента залізобетонної плити і визначається за формулою [247, 248, 284]:

$$F_{\theta} = \frac{1}{n} w_c l \sum_{i=1}^n \sigma_{\theta_i}(\varepsilon_c(\theta)).$$
(4.50)

У рівняння (4.49) також враховано відстань *у*<sub>*c*</sub> від нижньої поверхні плити до точки прикладення сили *F*<sub>*θ*</sub>, що визначається за формулою [247, 248, 284]:

$$y_{c} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_{i} \sigma_{\theta i}(\varepsilon_{c}(\theta))}{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{\theta i}(\varepsilon_{c}(\theta))}.$$
(4.51)

Напруження, що виникають унаслідок дії температурних деформацій визначаються за формулами, наведеними у першому стовпчику табл. 4.1. У якості деформацій тут застосовується математична модель залежності температурних деформацій від температури, яка описується виразами [247, 248, 284]:

$$\varepsilon_{c}(\theta) = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \theta^{3},$$
  

$$\varepsilon_{c}(\theta) = 14 \cdot 10^{-3} \text{ для 700 }^{0}\text{C} < \theta \le 1200 \,^{0}\text{C}.$$
(4.52)

Отримані розрахункові методи дозволяють проаналізувати умови утворення тріщин, що можна розглядати як ознаки настання граничного стану втрати вогнестійкості за цілісністю [247–263, 284–289]. Запропоновані методи мають ієрархічну структуру, в основі якої знаходяться спрощені методи [284], тоді як на вершині запропоновані уточнені методи [247, 248], засновані на методі скінченних елементів.

#### 4.5. Висновки до розділу

В процесі досліджень було розв'язано науково-технічну задачу виявлення механізму утворення тріщин у залізобетонних порожнистих плитах перекриттів унаслідок теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі як наукового підгрунтя створення ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності. Запропонована ієрархічна система методів, в основі якої знаходяться спрощені методи, тоді як на вершині запропоновані уточнені методи засновані на методі скінченних елементів, базується на запропонованих математичних моделях, що є науковим підґрунтях для обох типів методів такої ієрархічної структури. При цьому були отримані такі основні наукові результати:

 розроблено комплекс математичних моделей, заснованих на застосуванні неявного метода інтегрування диференціальних рівнянь напруженодеформованого стану залізобетону порожнистих плит апроксимованих за методом скінченних елементів, на основі чого було розроблено методику числового дослідження поведінки фрагмента залізобетонної порожнистої в умовах впливу пожежі;

• за допомогою проведеного числового експерименту встановлено, що утворення наскрізних тріщин унаслідок утворення призми руйнування не може бути ідентифіковано, оскільки за визначеними ознаками появи тріщин у точках інтегрування не дозволяють однозначної їхньої інтерпретації;

• в процесі числового експерименту доведено, що утворення поздовжніх тріщин між верхнім краєм порожнин та верхньою поверхнею плити може бути однозначно ідентифіковано і визначено, межа вогнестійкості за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності відбувається на 44 хв;

• на основі аналізу виникнення поперечних тріщин у залізобетонній порожнистій плиті під час утворення призми руйнування встановлено, що причиною цього є розтягувальні напруження, що зумовлюють їхнє небезпечне

розкриття, перевищення якими межі міцності бетону на розтяг є індикатором настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності;

• на основі виявлення механізму утворення поперечних тріщин у залізобетонній порожнистій плиті під час утворенні призми руйнування із залученням теорії міцності бетону було розроблено математичну модель, що встановлює критерій набуття ними небезпеки з точки зору настання граничного стану втрати вогнестійкості за цілісністю;

• на основі аналізу виникнення поздовжніх тріщин у залізобетонній порожнистій плиті під час дії сил температурного розширення у нижніх більш нагрітих її внутрішніх шарів встановлено, що причиною цього є розтягувальні напруження у її верхніх шарах, які зумовлюють їхнє небезпечне розкриття;

• на основі виявлення механізму утворення поздовжніх тріщин у залізобетонній порожнистій плиті під час дії напружень температурного розширення нижніх шарів розроблено математичну модель, що встановлює критерій настання граничного стану втрати вогнестійкості за цілісністю;

• розроблені математичні моделі утворення небезпечних тріщини з огляду настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, що є науковим підгрунтям щодо створення спрощених методів розрахункового оцінювання вогнестійкості за настанням вказаного граничного стану залізобетонними порожнистими плитами.

# РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНКОВЕ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РЕБРИСТИХ ПЛИТ ЗА НАСТАННЯМ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ВТРАТИ ЦІЛІСНОСТІ

## 5.1. Уточнений метод прогнозування настання граничного стану втрати цілісності залізобетонних ребристих плит в умовах впливу пожежі

Під час дослідження умов настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонних ребристих плит під впливом пожежі з використанням розрахункового методу також може бути запропонований спрощений інженерний підхід, який має у свої основі певні припущення та гіпотези. Для встановлення цих посилань та припущень необхідно провести дослідження закономірностей та основних механізмів настання граничного стану 38 ознакою втрати цілісності. За таких умов може бути використано розрахунково-теоретичні дані [285-299]. Як експериментальні або це неодноразово зазначалося у цій роботі використання експериментального підходу натикається на ускладнення, що полягає у підвищеній вартості та трудомісткості проведення експериментів, а також неоднозначності під час фіксування ознак настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності [285-299]. Альтернативою цьому є застосування розрахункового підходу, що має у своїй основі універсальні математичні моделі, закони які виражають теплопередачі та механіки деформованого тіла у поєднанні із феноменологічними аспектами поведінки залізобетону під час теплового впливу пожежі. Зокрема мовиться про використання диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану у разі їхньої апроксимації за методом скінченних елементів. В процесі застосування цього підходу із використанням даних, отриманих на основі проведеного математичного моделювання, описаного у попередньому розділі цієї роботи, можна сформулювати положення, що дозволять сформувати спрощений підхід до цієї проблеми [285–299].

Таким чином, для проведення математичного моделювання поведінки залізобетонної ребристої плити було сформульовано припущення та основні положення, які подані нижче.

1. Для розрахунку використовується базова математична модель, що описує напружено-деформований стан у залізобетонних ребристих плитах під час пожежі, у вигляді загальної системи диференціальних рівнянь НДС механіки твердого тіла, яка інтегрується із залученням МСЕ.

2. Теплопередача у внутрішніх шарах залізобетонних ребристих плит відбувається тільки у бетоні, враховуючи велику різницю теплопровідностей бетону та арматурної сталі, і описується за допомогою нестаціонарного диференціального рівняння теплопровідності з граничними умовами III роду. Диференціальне рівняння теплопровідності апроксимується за допомогою метода скінченних елементів.

3. Теплові та механічні процеси не залежать одне від одного і обчислення теплових та механічних параметрів відбувається за умови вирішення двох автономних задач – теплотехнічної та статичної.

4. Теплові характеристики бетону залежать тільки від температури і приймаються за рекомендаціями [285–299].

5. Механічні характеристики бетону та арматурної сталі встановлюються нелінійно залежними від деформації СЕ та враховують їхню деградацію під впливом температури. При цьому мають бути враховані великі деформації залізобетонних ребристих плит, такі що можуть бути порівняні з їхніми габаритними розмірами. Механічні характеристики бетону та арматурної сталі приймаються за рекомендаціями [285–299].

6. Базова система диференціальних рівнянь, що описує НДС, інтегрується за допомогою числового методу скінченних елементів із залученням ітеративного методу Ньютона-Рафсона для лінеаризації диференціальних рівнянь, шляхом покрокового прикладання наявного механічного навантаження до фіксування ознак руйнування досліджуваних залізобетонних плит. Для реалізації розрахунку застосовується математичне описання, наведене у п. 4.1.1 роботи. 7. Для обчислення параметрів НДС у залізобетонних ребристих плитах під час теплового впливу пожежі враховується нелінійна поведінка бетону та арматурної сталі під час нагрівання за умови використання повних несиметричних діаграм деформування із спадною гілкою.

8. Феноменологія поведінки бетону та арматурної сталі також враховується під час відповідної модифікації матриць, що описують поведінку матеріалів з врахуванням появи пластичних деформацій та тріщин у вузлах СЕ.

9. Ознаками повного руйнування досліджуваних залізобетонних ребристих плит є:

• поява розбіжності ітеративного процесу обчислення внаслідок втрати геометричної незмінності системи;

• поява граничних величин пластичних деформацій у вузлах СЕ моделі залізобетонних ребристих плит;

• фіксації критичних значень швидкості нарощення глобальних переміщень точок СЕ моделі залізобетонних ребристих плит.

### 5.2. Початкові дані та основні розрахункові схеми залізобетонної ребристої плити

Для вивчення умов настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонними ребристими плитами було проведене дослідження окремої залізобетонної ребристої плити, конструктивна схема якої зображена на рис. 5.1. Дана плита є типовим залізобетонним виробом, розробленим згідно з проєктною документацією, що міститься в серії 1.465.1. У цій серії наведені основні проєктні дані для ребристих залізобетонних плит покриттів, які застосовуються в одноповерхових виробничих і житлових будівлях.

Вибір саме таких плит для дослідження обумовлений їхнім широким використанням у будівельній галузі, що робить отримані результати актуальними для оцінювання поведінки аналогічних конструкцій. Основною особливістю цих плит є наявність поздовжніх ребер жорсткості, які підсилюються арматурними стержнями. Таке конструктивне рішення забезпечує підвищену міцність і несучу здатність плити, а також впливає на її поведінку за умов термомеханічного навантаження.



Рис. 5.1. Досліджувана залізобетонна ребриста плита: *а* – загальний вигляд конструкції з геометричними параметрами; *б* – конструктивна схема із зазначенням розташування арматури

Технічні дані бетону, що було прийнято для проведення обчислювальних експериментів, наведені в табл. 5.1. У цій таблиці зазначені основні характеристики для бетону залізобетонної ребристої плити.

Таблиця 5.1

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
Клас міцності бетону	-	C 20/25

Технічні дані щодо залізобетонної ребристої плити

Продовження таблиці 5.1

Густина	кг/м <sup>3</sup>	2400
Границя міцності	МПа	20
Розмір крупного заповнювача	М	0.02
Коефіцієнт Пуассона	-	0.3

Технічні дані щодо арматурної сталі наведені в табл. 5.2. У цій таблиці зазначені основні характеристики для сталі арматурних стержнів залізобетонної ребристої плити.

Таблиця 5.2

Технічні дані щодо арматурної сталі ребристої плити

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина	
Густина	кг/м <sup>3</sup>	7850	
Модуль пружності	МПа	$2 \cdot 10^5$	
Коефіцієнт Пуассона	-	0.2	
Арматура у поздовжніх ребрах			
Клас міцності	-	A400	
Границя міцності	МПа	400	
Діаметр	ММ	16	
Арматура у поперечних ребрах			
Клас міцності	-	A400	
Границя міцності	МПа	400	
Діаметр	ММ	12	
Армування панелі			
Клас міцності	-	A400	
Границя міцності	МПа	400	
Діаметр	ММ	8	

На рис. 5.2 зображена схема залізобетонної ребристої плити із прикладеним розподіленим навантаженням до її верхньої поверхні.



Рис. 5.2. Схема прикладання навантаження до поверхні залізобетонної ребристої плити

На рис. 5.2 на зображеній схемі залізобетонної ребристої плити показані опорні поверхні, які являють собою тверді тіла, що обумовлюється прийнятим матеріалом. Спирання плити на ці опори здійснюється шляхом моделювання контактної взаємодії між окремими частинами моделі, автоматично створеними в системі як частини з різного матеріалу. Контактна взаємодія встановлена автоматична типу «поверхня-поверхня» з урахуванням тертя між ними за узагальненим законом Кулона з коефіцієнтом тертя  $\mu = 0,6$  (тертя між сталевою поверхнею та поверхнею бетону).

Згідно із рекомендаціями [285–299] статичні задачі моделювання НДС залізобетонних плит у разі одностороннього впливу на них пожежі зі стандартним температурним режимом вирішувалися з поетапним відтворенням історії навантаження у дві стадії. На першій стадії моделювалося прикладання діючого навантаження до досліджуваної залізобетонної ребристої плити. На другій стадії – як навантаження до плити прикладалися розподіл температури до вузлів СЕ.

Так само як і для залізобетонної порожнистої плити щодо вибору СЕ для моделі ребристої плити були прийняті такі основні положення.

1. Для моделювання бетону й абсолютно твердих опор використовується 8-вузловий гексаедричний СЕ, для моделювання сталевої арматури 2-вузловий стрижневий СЕ.

2. Всі типи СЕ є фізично нелінійними, їхні властивості відповідають моделям нелінійної поведінки матеріалів, описаних у п. 4.1 та п. 4.2 роботи.

На рис. 5.3 показаний загальний вигляд скінченно-елементної схеми залізобетонної ребристої плити, що є відповідно дискретизованою розрахунковою областю.



Рис. 5.3. Скінченно-елементна схема залізобетонної ребристої плити із опорними поверхнями

Можна побачити, що на скінченно-елементній схемі, наведеній на рис. 5.3, сітка СЕ бетону й арматурного каркаса має достатньо велике розрідження. Така сітка забезпечує найбільш вдале сполучення між продуктивністю та точністю розрахунку. Розміри та кількість СЕ у схемі залізобетонної ребристої плити подані у табл. 5.3.

Частина моделі	Мін. розмір, мм	Макс. розмір, мм	Кількість
Бетонна основа	25	100	4128
Арматура	100	100	1328
Опори	32.5	100	32
Загальна кількість скінченних елементів:		5488	

Параметри, які визначають густоту сітки, обрані для забезпечення доброї збіжності обчислювального процесу. За результатами проведених досліджень [291] було встановлено, що обрані параметри сітки є найбільш оптимальними для розв'язання теплотехнічної та статичної задач.

## 5.3. Результати моделювання настання граничного стану втрати цілісності залізобетонних ребристих плит в умовах впливу пожежі

Під час моделювання процесу теплопередачі в залізобетонній ребристій плиті за умови теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі отримані температурні дані у внутрішніх шарах [285–299]. На рис. 5.4 наведені температурні розподіли у залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу.

На рис. 5.4 видно, що внутрішні шари плити достатньо сильно прогріваються, особливо у панелі між ребрами.



Рис. 5.4. Температурні розподілення у залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу: *a* – 30 хв; *б* – 45 хв; *в* – 60 хв

Таблиця 5.3

Для аналізу нагрівання арматурних стержнів у залізобетонній ребристій плиті було побудовано температурні криві їхнього нагрівання залежно від часу. На рис. 5.5 наведено побудовані криві нагрівання арматури у досліджуваній конструкції.



Рис. 5.5. Температурні криві нагрівання арматурних стержнів залізобетонної ребристої плити залежно від часу: *1* – у поздовжньому ребрі; *2* – у поперечному ребрі; *3* – у панелі між ребрами

На кривих рис. 5.5 можна побачити, що найбільше прогрівається арматура у панелі між ребрами, оскільки вона має найменший захисний шар, трохи повільніше збільшується температура у поперечних ребрах, і найповільніше прогрівається арматура у поздовжніх ребрах, оскільки має найбільший захисний шар. Такий стан дозволяє зробити припущення, що найшвидше може зруйнуватися панель між ребрами. Формально можна встановити, що її руйнування відноситься скоріше до втрати цілісності, аніж до втрати несучої здатності, яка пов'язується із несучою здатністю поздовжніх ребер залізобетонної ребристої плити.

Для того, щоб проаналізувати настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності, був побудований графік середньої температури на необігрівній поверхні досліджуваної залізобетонної плити [285–299].
На рис. 5.6 показаний побудований температурний графік прогрівання не обігрівної поверхні залізобетонної ребристої плити, на якому також показана гранична температура щодо настання стану втрати теплоізолювальної здатності.



Рис. 5.6. Графік нагрівання необігрівної сторони досліджуваної залізобетонної ребристої плити

Графік на рис. 5.6 показує що межа вогнестійкості за настанням стану втрати теплоізолювальної здатності для цієї плити становить 13 хв. Для плит покриттів це є допустимим, оскільки для них втрата теплоізолювальної здатності не нормується.

Отримані результати розв'язання теплотехнічної задачі, які були детально описані вище, використано для проведення подальших розрахунків параметрів напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити відповідно до прийнятого підходу при розв'язанні статичної задачі.

Після виконання обчислень було сформовано набір даних, що характеризують напружено-деформований стан залізобетонної ребристої плити на різних етапах її нагрівання. Ці результати підлягають детальному аналізу з метою виявлення ключових аспектів та закономірностей розвитку деформацій і утворення тріщин, що можуть призвести до настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонної ребристої плити під впливом високотемпературного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. За результатами проведених обчислювальних експериментів під час математичного моделювання за допомогою методу скінченних елементів було отримано цікаву картину нарощування вертикальних переміщень плити, що продемонтрована на рис. 5.7. [285–299]. Як видно на рис. 5.7 під час дії прикладеного силового навантаження (у даному випадку  $q_E = 1,8$  кH/м, тобто 30 % від руйнівного навантаження) плита має найбільші вертикальні переміщень має круглу форму.

Під час моделювання теплового впливу у вигляді стандартного температурного режиму пожежі на залізобетонну ребристу плиту спочатку зона найбільших переміщень має форму еліпса витягнутого вздовж поздовжньої осі плити. На етапах вже більш тривалішого теплового впливу на досліджувану конструкцію найбільші переміщення концентруються у комірках плити, утворених поздовжніми та поперечними ребрами.

Також на рис. 5.7 можна побачити, що досліджувана залізобетонна ребриста плита в умовах сумісного теплового та механічного навантаження поступово вигинається нагору. Це може бути пояснене температурним розширенням панелі плити між ребрами внаслідок теплового впливу температурного режиму пожежі [293–295].

Наведені розподілення вертикальних переміщень у залізобетонній ребристій плиті в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі (рис. 5.7) показують, що можливо втрата цілісності відбувається через руйнування панелі у комірках між поздовжніми та поперечними ребрами досліджуваної ребристої плити.

Також одним з обчислених параметрів, що є важливим для оцінювання можливості утворення наскрізних дефектів у залізобетонних ребристих плитах, за якими можна зафіксувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, є напруження, через які виникають пластичні деформації у бетоні.



Рис. 5.7. Розподілення вертикальних переміщень (м) у досліджуваній залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: a - 0 хв;  $\delta - 1$  хв; e - 3 хв; e - 5 хв;  $\partial - 25$  хв

На рис. 5.8 показані побудовані розподілення значень напруження, під час виникнення еквівалентної пластичної деформації по простору бетонної основи

залізобетонної ребристої плити [293–295].



Рис. 5.8. Розподіли величини напружень (Па) під час виникнення еквівалентної пластичної деформації по простору бетонної основи залізобетонної ребристої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: a - 0 хв; 6 - 10 хв; e - 25 хв

Аналізуючи розподіли пластичних напружень, можна побачити, що гіпотеза руйнування шару бетону у комірках, які утворюються між поздовжніми та поперечними ребрами залізобетонної ребристої плити, підтверджується, оскільки вони найбільше концентруються біля ребер.

Ще одним важливим параметром, що дає змогу зафіксувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності є розподілення «тріщин», настання яких ідентифікується у точках інтегрування, якщо застосувати теорії міцності. На рис. 5.9 показані отримані розподілення тріщин у різні моменту часу.

Аналізуючи картини розподілів тріщин у бетоні залізобетонної ребристої плити, що показані на рис. 5.9, як і в попередньому розділі можна зазначити, що опираючись тільки на ці розподіли, неможливо однозначно ідентифікувати появу наскрізних тріщин, оскільки поява ушкодження в одній або декількох точках інтегрування не дозволяє зробити висновок, що тріщини будуть наскрізними. Такі

тріщини у досліджуваній залізобетонній ребристій плиті відіграють роль ефективної характеристики, щоб адекватно описати поведінку залізобетону під час термосилового впливу пожежі.



Рис. 5.9. Розподіл тріщин у бетоні залізобетонної ребристої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: a - 0 хв;  $\delta - 10$  хв; 6 - 25 хв

Розшифровка позначень тріщин і дефектів у бетоні подана на рис. 4.8.

Для розуміння механізму руйнування внутрішніх шарів плити було побудовано криві вертикальних переміщень залізобетонної ребристої плити для різних умов навантаження. На рис. 5.10 показані побудовані криві.

Аналіз графіків [293–295] на рис. 5.10 показує, що імовірно руйнування у поздовжньому ребрі плити можливе тільки у разі прикладення навантаження

більше 70 %, оскільки чіткий загин кривої максимального прогину можна спостерігати саме у цьому випадку. Проте, можна впевнено побачити, що панель у комірці між ребрами має чіткий виражений загин. Це означає, що у всіх випадках руйнування плити відбувається саме внаслідок руйнування панелі між ребрами.

Тож можна припустити, що граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для досліджуваної залізобетонної ребристої плити в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, а також механічного навантаження настає з причини руйнування панелі між ребрами, коли несуча здатність поздовжніх ребер зберігається.



Рис. 5.10. Графіки максимального прогину залізобетонної ребристої плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі: a - y зоні поздовжнього ребра,  $\delta - y$  точці посередині панелі в комірці між ребрами плити при різних рівнях діючого навантаження: 1 - 30 % від максимального; 2 - 50 % від максимального; 3 - 70 % від максимального; 4 - 90 % від максимального

Для вивчення механізму руйнування були побудовані розподілення величини вертикальних переміщень для залізобетонних ребристих плит за різного рівня прикладеного діючого механічного навантаження. Побудовані розподілення вертикальних переміщень для досліджуваної конструкції показані на рис. 5.11.



Рис. 5.11. Розподілення вертикальних переміщень (м) у досліджуваній залізобетонній ребристій плиті в момент руйнування при різних рівнях прикладеного діючого навантаження: *a* – 30 % від максимального навантаження; *б* – 50 % від максимального навантаження; *в* – 70 % від максимального навантаження

Можна побачити що на рис. 5.11, характер руйнування панелі між ребрами залізобетонної ребристої плити відповідає характеру руйнувань при вогневих випробування таких плит, що описані у роботі [138].

На рис. 5.12 наведена картина руйнувань залізобетонних ребристих плит в умовах впливу вогневих випробувань [138].



Рис. 5.12. Характер руйнувань панелі ребристої залізобетонної плити під час її вогневих випробувань [138]: *a* – прорив вогню через тріщини та отвори в плиті; *б* – руйнування верхньої поверхні панелі плити після випробувань

Проведені дослідження щодо поведінки залізобетонних ребристих плит в умовах вогневих випробувань дозволили встановити високу точність відтворення теплових і механічних процесів, що відбуваються в таких конструкціях під час впливу високих температур при математичному моделюванні. Аналіз результатів i3 застосуванням методу скінченних елементів підтвердив моделювання достовірність отриманих ïx відповідність експериментальним даних та дослідженням. Це, своєю чергою, засвідчує можливість використання такого підходу як уточненого методу для оцінювання вогнестійкості залізобетонних застосування числового моделювання дозволяє ребристих плит. Зокрема, визначати момент настання граничного стану за ознакою втрати цілісності, що є ключовим критерієм оцінки вогнестійкості цих конструкцій. За таким підходом для цього можна використовувати криві типу графіків, зображених на рис. 5.13. На рис. 5.13 проілюстровані криві, що відображають умови настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності. Вони отримані в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, а також під дією механічного навантаження. Також представлено метод ідентифікації межі вогнестійкості за цими кривими [293–295].



Рис. 5.13. Графіки максимального прогину точки посередині панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі за різних значень діючого навантаження із встановленими межами вогнестійкості: 1 – 30 % від максимального навантаження; 2 – 50 % від максимального навантаження; 3 – 70 % від максимального навантаження

Узагальнюючі отримані дані, було прослідковано залежність значення межі вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності від рівня прикладеного діючого механічного навантаження (рис. 5.14) [293].



Рис. 5.14. Графік залежності межі вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності від рівня прикладеного діючого механічного навантаження у відсотках від максимального

Отримана залежність що представлена на рис. 5.14. наближена до лінійної [293].

## 5.4. Розроблення спрощеного методу розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за граничним станом втрати цілісності

результати Враховуючи отримані щодо моделювання напруженодеформованого стану у залізобетонних ребристих плитах, які описані вище, можна описати основний механізм утворення дефектів, зв'язаних із настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Згідно із отриманими даними втрата цілісності відбувається через руйнування панелі між ребрами плити. Весь процес деформування та руйнування плити відбуваєтся у декілька етапів. На першому етапі відбувається деформація плити під впливом діючого навантаження у вигляді її згину донизу. Після початку теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі внаслідок температурного розширення бетону панелі між ребрами згин починає поступово зменшуватися і в певний момент часу плита вигинається вверх, проте під впливом нагрівання утворюються комірки між ребрами, в яких панель згинається вниз і набуває форми лунок. Руйнування утворених комірок панелі між ребрами плити при цьому відбувається шляхом утворення тріщин по границях цих комірок (рис. 5.7 та рис. 5.9). Часткові руйнування панелі за таким механізмом і зумовлюють настання втрати цілісності цієї плити.

Загалом, вищеописаний механізм можна проілюструвати геометричною схемою, яка встановлює основні особливості утворення дефектів (рис. 5.15) [284].

З огляду на отримані дані [284] щодо механізму руйнування панелей між ребрами залізобетонної ребристої плити в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі було сформульовано основні передумови, гіпотези та припущення для створення спрощеного методу розрахункового оцінювання вогнестійкості за критерієм настання граничного стану втрати цілісності, які полягають у наступному.



Рис. 5.15. Геометрична схема механізму руйнування утворення дефектів, зв'язаних із настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності залізобетонної ребристої плити в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі

1. При руйнуванні панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити відбувається по лініям, де розташовані «пластичні шарніри», двох типів: лінія, що окреслює зовнішній контур зони руйнування та прямі лінії, що окреслюють разом із лінією контуру чотири фасетки. Ці фасетки складають геометрично змінну систему.

2. Для розрахункового оцінювання використовується обчислення віртуальних робіт зовнішніх та внутрішніх сил із застосуванням принципу можливих переміщень.

3. Критерієм руйнування панелі між ребрами залізобетонної ребристої плити є перевищення величини сумарної віртуальної роботи зовнішніх сил величини сумарної віртуальної роботи внутрішніх сил.

4. Сумарна робота внутрішніх сил визначається із використанням внутрішніх граничних моментів, які визначаються за допомогою рекомендацій EN

1992-1-2 з урахуванням зниження здатності до опору залізобетону за зонним методом [15].

5. Віртуальні роботи обчислюються на можливих переміщеннях кінематичної системи, яка утворюється на лініях «пластичних шарнірів».

6. Враховуючи результати досліджень, наведених у роботах [284, 293–295], лінія контуру зони руйнування наближується за допомогою ліній Безьє.

Використовуючи сформульовані положення та схему, зображену на рис. 5.15, було побудовано розрахункову схему, представлену на рис. 5.16.

Лінія зовнішнього контуру зони руйнування панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити може бути апроксимована за допомогою кривої Безьє [284, 293–295]. Використання апроксимації такого типу обумовлюється особливими властивостями кривих Безьє. Вказані криві є неперервним за похідними першого та другого порядку, дають змогу враховувати особливості зони руйнування панелі у комірці між ребрами плити з обчисленням поточних величин геометричних характеристик для розрахунку як внутрішніх, так і зовнішніх моментів [284].



Рис. 5.16. Розрахункова схема до апроксимації ліній пластичних шарнірів, за якими відбувається руйнування панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити

Додатковим обґрунтування того, що лінії Безьє науповніше відтворюють лінію розподілу «пластичних шарнірів» у плиті, є геометричне представлення алгоритму їхнього побудування, зображене на рис. 5.17 [284].



Рис. 5.17. Геометрична схема алгоритму побудування ліній Безьє

На рис. 5.17 можна побачити, що діючий внутрішній пластичний момент направлений вздовж дотичної до кривої, яка побудована на прямих, що обмежують зону руйнування у комірці між ребрами плити.

Вектор координат опорних точок, через які визначають вигляд функції лінії Безьє, у загальному випадку обчислюється за виразом [284]:

$$\mathbf{F}(u) = \sum_{k=1}^{n} \mathbf{q}_{k} B_{k,n}(u), \ 0 \le u \le 1,$$
(5.1)

де n = 3 - кількість опорних точок;

 $B_{k,n}(u)$  – поліноми Бернстайна для узгодження ліній Безьє;

 $\boldsymbol{q}_k$  – вектор координат опорних точок для побудування лінії Безьє;

Поліноми Бернстайна описуються формулою:

$$B_{k,n}(u) = \frac{n!}{k!(n-k)!} u^k (1-u)^{n-k}, \qquad (5.2)$$

Векторний вираз (5.1) у цьому випадку розкладається на алгебраїчну систему, яка складається з двох параметричних рівнянь:

$$x(u) = \sum_{k=1}^{n} x_k B_{k,n}(u), \quad y(u) = \sum_{k=1}^{n} y_k B_{k,n}(u).$$
(5.3)

Для складення виразу для обчислення віртуальних робіт внутрішніх сил була використана розрахункова схема, представлена на рис. 5.18.



Рис. 5.18. Схема для визначення можливих переміщень при визначенні роботи внутрішніх сил у зоні руйнування панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити

Враховуючи схеми, представлені на рис. 5.16 та рис. 5.18, елементарні роботи внутрішніх сил для одної симетричній чверті системи фасеток у певній точці A(x(u),y(u)) в ортогональних напрямках визначаються за виразами:

$$dW_{x} = \frac{m_{x}}{L_{rx}(u)}dl(u) + \frac{m_{x}}{L_{rx}(u)}x_{0}, \ dW_{y} = \frac{m_{y}}{L_{ry}(u)}dl(u) + \frac{m_{y}}{L_{ry}(u)}y_{0}.$$
(5.4)

Тут елементарна ділянка кривої та довжина на схемі елементарної кінематичної системи (рис. 5.18) визначаються формулами:

$$dl(u) = \sqrt{\left(\frac{dx(u)}{du}\right)^{2} + \left(\frac{dy(u)}{du}\right)^{2}}, \ L_{rx}(u) = y(u), \ L_{ry}(u) = x(u).$$
(5.5)

Враховуючи формули (5.4) та (5.5), формула для визначення віртуальних робіт внутрішніх сил симетричної чверті механічної системи, що складається з фасеток має вигляд:

$$W = W_{x} + W_{y},$$

$$W_{x} = m_{x} \int_{0}^{1} \frac{1}{y(u)} \left( \sqrt{\left(\frac{dx(u)}{du}\right)^{2} + \left(\frac{dy(u)}{du}\right)^{2}} + x_{0} \right) du,$$

$$W_{y} = m_{y} \int_{0}^{1} \frac{1}{x(u)} \left( \sqrt{\left(\frac{dx(u)}{du}\right)^{2} + \left(\frac{dy(u)}{du}\right)^{2}} + y_{0} \right) du,$$
(5.6)

Перші похідні від функцій, які описують криві Безьє, обчислюються за виразами [284]:

$$\frac{dx(u)}{du} = \sum_{k=1}^{n} x_k B'_{k,n}(u), \ \frac{dy(u)}{du} = \sum_{k=1}^{n} y_k B'_{k,n}(u).$$
(5.7)

Похідні від поліномів Бернстайна обчислюються за формулою:

$$B'_{k,n}(u) = B_{k,n}(u) \frac{k - nu}{u(1 - u)},$$
(5.8)

У рівняннях (5.4) *m<sub>x</sub>* та *m<sub>x</sub>* – погонні граничні моменти, які визначаються за формулами:

$$m_x = \frac{M_{Rd,fi,x}}{l_s}, \ m_y = \frac{M_{Rd,fi,y}}{l_s},$$
 (5.9)

де  $M_{Rd, fi, x}$  та  $M_{Rd, fi, y}$  – граничні моменти фрагментів панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити у ортогональних напрямках вздовж арматурних стержнів. Ці моменти визначаються за рекомендаціями EN 1992-1-2 з врахуванням зниження здатності до опору залізобетону за зонним методом [15]. Для визначення віртуальних робіт зовнішніх сил використовується розрахункова схема, зображена на рис. 5.19 [284].



Рис. 5.19. Схема для визначення можливих переміщень при визначенні роботи зовнішніх сил у зоні руйнування панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити

Враховуючи схеми, представлені на рис. 5.16 та рис. 5.19, елементарні роботи зовнішніх сил для одної симетричній чверті системи фасеток у певній точці A(x(u),y(u)) в ортогональних напрямках визначаються за виразами:

$$dU_{x} = \frac{1}{2}Q_{Ed} \frac{dx(u)}{du} y(u), \ dU_{y} = \frac{1}{2}Q_{Ed} \frac{dy(u)}{du} x(u).$$
(5.10)

Враховуючи формули (5.10), формула для визначення віртуальних робіт зовнішніх сил симетричної чверті механічної системи, що складається з фасеток (рис. 5.16) має вигляд:

$$U = U_{x} + U_{y},$$

$$U_{x} = \frac{1}{2} Q_{Ed} \int_{0}^{1} \frac{dx(u)}{du} y(u) du,$$

$$U_{y} = \frac{1}{2} Q_{Ed} \int_{0}^{1} \frac{dy(u)}{du} x(u) du.$$
(5.11)

Для визначення відповідності до заданого класу вогнестійкості має бути перевірена відповідна умова, що має такий вигляд [284]:

$$W \ge U. \tag{5.12}$$

Таким чином, у даній роботі запропонований спрощений метод розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

#### 5.5. Висновки до розділу

В процесі досліджень було розв'язано науково-технічну задачу виявлення механізму утворення тріщин та дефектів у залізобетонних ребристих плитах перекриттів унаслідок теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі як наукового підґрунтя створення ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Запропонована ієрархічна система методів, в основі якої знаходяться спрощені методи, а на вершині запропоновані уточнені методи, засновані на методі скінченних елементів, базується на запропонованих математичних моделях, що є науковим підґрунтях для обох типів методів цієї ієрархічної структури. При цьому були отримані такі основні наукові результати:

 на основі розробленого комплексу математичних моделей заснованих на застосуванні неявного метода інтегрування диференціальних рівнянь напруженодеформованого стану залізобетону порожнистих плит апроксимованих за методом скінченних елементів було розроблено методику числового дослідження поведінки залізобетонної ребристої плити під час нагрівання в умовах впливу пожежі;

• встановлено, що найбільше за все прогрівається панель у комірці між ребрами плити, що дозволило зробити попереднє припущення, що руйнування

плити буде відбуватися саме у цій зоні і може бути пов'язане із настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності;

• в процесі математичного моделювання встановлено, що зона руйнування внаслідок впливу пожежі утворюється у комірках панелі між ребрами плити після виникнення тріщин по границях цих комірок;

• на основі аналізу виникнення поперечних тріщин у залізобетонній ребристій плиті під час утворення зони руйнування встановлено, що причиною цього є розтягувальні напруження у зонах локальних деформацій у комірці між ребрами плити, які мають форму лунок, що дозволило сформулювати основні положення та припущення для розробки спрощеного методу оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності;

• на основі виявлення механізму утворення тріщин у зоні руйнування залізобетонної ребристої плити у комірці між ребрами було розроблено математичну модель, що встановлює енергетичний критерій набуття ними небезпеки з точки зору настання граничного стану втрати вогнестійкості за цілісністю;

• розроблені математичні моделі утворення небезпечних тріщини з огляду настання граничного стану втрати вогнестійкості за цілісністю, що є науковим підґрунтям щодо створення спрощених методів розрахункового оцінювання вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності залізобетонних ребристих плит.

## РОЗДІЛ 6 ІЄРАРХІЧНА СТРУКТУРА РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА НАСТАННЯМ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ВТРАТИ ЦІЛІСНОСТІ

6.1. Розробка табличного розрахункового методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за ознакою втрати цілісності

Дослідження, результати яких наведені у 4 розділі, показали, що визначення утворення наскрізних тріщин у залізобетонних порожнистих плитах в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі можливе за допомогою уточненого та спрощеного підходів оцінювання вогнестійкості таких конструкцій.

Найбільш точний результат можна отримати у разі використання уточненого підходу, комбінуючи неявний та явний методи інтегрування рівнянь механіки процесів, що відбуваються у залізобетонній порожнистій плиті під час теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Табличний метод є найпростішим з існуючих, проте водночас найбільш суворим щодо висування вимог, оскільки цей підхід базується на порівнянні лише двох геометричних параметрів конструкції (осьова відстань арматури та ширина або товщина конструкції) та не враховує рівня навантаження, матеріалу, а також геометричних характеристик конструкцій, що чинять опір характерним навантаженням для горизонтальних огороджувальних конструкцій. У настанові EN 1992-1-2 [15] наведена табл. 5.9 про певні мінімальні геометричні розміри плит для забезпечення відповідного класу вогнестійкості. Проте, ця таблиця може бути уточнена з огляду на нові дані про втрату цілісності [284], отримані за допомогою підходів, запропонованих у 4 розділі роботи.

Для комплексного дослідження було запропоновано прослідкувати закономірність залежності межі вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит від їхніх найбільш значущих геометричних параметрів, у цьому випадку це осьова відстань арматурних стержнів та товщина плити.

Згідно із прийнятим припущенням межа вогнестійкості пов'язана із геометричними параметрами залізобетонних порожнистих плит лінійною поліноміальною залежністю типу [284, 300–303]:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2, \tag{6.1}$$

де x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub> – фактори, які відповідають початковим параметрам залізобетонних порожнистих плит, у нашому випадку це осьова відстань арматурних стержнів та товщина плити.

Такий тип регресії вибраний за результатами досліджень, наведених у роботах [284, 300–303].

У такому разі, для встановлення регресійної залежності даного типу застосовується матриця плану експерименту, яка має вигляд табл. 6.1 [284].

Таблиця 6.1

N⁰	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$
1	+	+	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	-	-	+

Матриця планування повного факторного експерименту для побудування регресії

У табл. 6.2 наведені інтервали факторів для здійснення повного факторного експерименту [284].

Для отримання опорних даних для реалізації повного факторного експерименту були прийняті найбільш поширені конструктивні характеристики залізобетонних порожнистих плит.

### Таблиця 6.2

Товщина плити, <i>H</i> , мм			Осьс	ова відстань, <i>w</i>	, MM
Найменше	Середнє	Найбільше	Найменше	Середнє	Найбільше
значення,	значення,	значення	значення, <i>w</i> <sub>-1</sub>	значення, w <sub>0</sub>	значення, w <sub>1</sub>
<i>H</i> <sub>-1</sub>	$H_0$	$H_1$ ,			
220	260	300	10	20	30

Інтервали варіювання факторів у повному факторному експерименті

Механічні характеристики бетону та арматурної сталі, а також геометричні характеристики арматури наведені у табл. 6.3 [284].

Таблиця 6.3

	•	•	•		•	ب	•	••	
le	х н1чн	<b>1</b> 1	лан1	шоло	32 1130	оетонно	1 ПС	рожнистоі	ппити
101		**	даш	щодо	5001150		1 110	pomineror	110111111

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
Бетон		
Клас міцності	-	C 20/25
Густина	кг/м <sup>3</sup>	2400
Границя міцності	МПа	20
Коефіцієнт Пуассона		0.3
Товщина бетону між порожниною	MM	40 мм при <i>H</i> = 300 мм
та верхньою по верхньою плити	IVIIVI	28 мм при <i>H</i> = 220 мм
Робоча арматура		
Клас міцності	-	A400
Границя міцності	МПа	400
Діаметр	ММ	12
Прикладене навантаження у відсотках від максимального	%	70

Варіюючи відповідні параметри за матрицею плану за табл. 6.1 та табл. 6.2 за результатами проведених розрахунків за запропонованими математичними моделями уточненого розрахункового методу та використовуючи параметри з табл. 6.3, отримані дані для проведення повного факторного експерименту, які наведені у табл. 6.4 [247, 248, 284].

Таблиця 6.4

Параметри пожеж у модельних приміщеннях під час повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування

Експериментальна ситуація	1	2	3	4
Межа вогнестійкості, U <sub>e</sub> , хв	75	51	64	41

Завдяки використанню отриманих результатів повного факторного експерименту для побудування регресії, наведених у табл. 6.4, було обчислено відповідні коефіцієнти регресійної залежності (6.1) за наступними формулами [284, 300–303]:

$$b_{0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y_{i}, \ b_{1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_{1} y_{i},$$

$$b_{2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_{2} y_{i}, \ b_{3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_{1} x_{2} y_{i},$$
(6.2)

де *N* = 4 – кількість експериментальних ситуацій відповідно до матриці повного факторного експерименту (див. табл. 6.1);

*x<sub>i</sub>* – величини відповідного фактора згідно із матрицею плану та діапазонами їхнього варіювання (див. табл. 6.1 та табл. 6.2);

*y<sub>i</sub>* – значення межі вогнестійкості за результатами відповідних числових експериментів за табл. 6.4.

За допомогою формул (6.2), були обчислені коефіцієнти регресії, які зведені до табл. 6.5.

Побудована регресія дозволяє прослідкувати залежність межі вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит від товщини плити та осьової відстані арматурних стержнів [284].

#### Таблиця 6.5

порожнистих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності Коефіцієнти регресії  $b_1$ ,  $b_{0}$ ,  $b_{2}$ ,  $b_{3}$ (6.1)57,75 0,25 Кодовані значення 5,25 11,75 3,37 0,119 0,000625 Реальні величини 1,01

Коефіцієнти регресії для визначення межі вогнестійкості залізобетонних

Це зручно зробити за допомогою відповідної побудованої поверхні, яка представлена на рис. 6.1. На побудованій поверхні видно що вона має майже точну плоску форму [284].



Рис. 6.1. Поверхня, відповідна залежності межі вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності від її товщини та осьової відстані арматурних стержнів

Визначати межу вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за їхніми найбільш значущими конструктивними параметрами зручно, якщо використати номограму, яка подана на рис. 6.2.

В процесі аналізі результатів розрахункового оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності було порівняно значення межі вогнестійкості, визначене за регресійною залежністю та за уточненим методом [247, 248, 284].



Рис. 6.2. Номограми залежності межі вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності від її товщини та осьової відстані арматурних стержнів

При цьому було використано абсолютне відхилення та відносне відхилення як критерії адекватності обчислених результатів. Отримані дані при аналізі адекватності розрахункових результатів за регресійною залежністю подані у табл. 6.6. [247, 248, 284].

Таблиця 6.6

Адекватність результатів оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит, визначених за регресійною залежністю

Межа вогнестійкості,	Межа	Абсолютне	Відносне			
обчислена	вогнестійкості,	відхилення, хв	відхилення, %			
за МСЕ, хв	обчислена за					
	регресійною					
	залежністю, хв					
Товщина плити <i>H</i> = 220 мм, Осьова відстань <i>w</i> = 15 мм						

Продовження таблиці 6.6

		1 1				
51	46,75	4,25	8,33			
Товщина плити Н = 220	) мм, Осьова відстань 1	w = 20 мм				
60,5	52,5	8	13,223			
Товщина плити H = 300 мм, Осьова відстань w = 15 мм						
67	57	10	14,925			
Товщина плити Н = 300	) мм, Осьова відстань в	w = 20 мм				
71	63	8	11,268			
Середнє значення						
-	-	7,563	11,937			

Результати аналізу адекватності, подані у табл. 6.6, вказують на те, що похибка розрахункового оцінювання вогнестійкості для залізобетонних порожнистих плит, розрахованих за регресійною залежністю, є несуттєвою, і отримана регресійна залежність може бути застосована для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності.

Завдяки застосуванню номограми, зображеної на рис. 6.2, була уточнена табл. 5.9, наведена у настанові EN 1992-1-2 [15]. Уточнена таблиця подана нижче у вигляді табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Стандартна	Мінімальні розміри (мм)			
вогнестійкість	Товщина плити h <sub>s</sub>	Осьова відстань а		
REI 30	220	15		
REI 45	220	20		
REI 60	220/300	30/20		
REI 90	300	35		

Мінімальні розміри та осьові відстані для залізобетонних порожнистих плит

Розроблена таблиця 6.7 дозволяє проводити оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит з врахуванням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

6.2. Ієрархічна структура методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану втрати цілісності

Проведені дослідження, результати яких описані у 4 розділі та у цьому розділі, дозволяють сформувати ієрархічний підхід до методів розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності [247, 248, 284].

Основним інструментом для досягнення такого результату є розроблені математичні моделі утворення тріщин, які мають наскрізний характер. Загалом, ці моделі, що отримані у результаті узагальнення великого обсягу експериментальних та розрахунково-теоретичних даних, застосовуються для розробки спрощених методів [247, 248, 284].

Згідно із настановами, які зазначені в нормативних документах [15], ієрархічна система методів розрахункового оцінювання за втратою несучої здатності – собою це структура в основі якої лежать спрощені методи, а на вершині – уточнені. Таку саму систему запропоновано використовувати і для оцінювання вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності. На рис. 6.3 представлена ієрархічна система методів розрахункового оцінювання залізобетонних порожнистих плит за цим граничним станом [247, 248, 284].

Кожний з методів ієрархічної системи розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності має три основних аспекти: набір початкових даних, розрахунковий алгоритм та спосіб інтерпретації результатів розрахунку, тобто критеріальна база, що вказує на настання або ненастання граничного стану за ознакою втрати цілісності [247, 248, 284].



Рис. 6.3. Ієрархічна система методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності

Таким чином, розроблена ієрархічна система дозволяє забезпечити відповідність нормативним вимогам щодо вогнестійкості будівельних конст.

## 6.3. Розробка табличного розрахункового методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за ознакою втрати цілісності

Результати досліджень, які представлені у 5 розділі роботи, продемонстрували, що визначення утворення наскрізних тріщин та/або дефектів у залізобетонних ребристих плитах, також можливе у разі використання уточненого та спрощеного підходів. Всі тенденції щодо використання різних підходів, описаних вище, зберігаються і для залізобетонних ребристих плит.

У настанові EN 1992-1-2 так само, як і для порожнистих плит, для ребристих плит [15] наведена аналогічна табл. 5.10 про певні мінімальні геометричні розміри цих плит для забезпечення відповідного класу вогнестійкості. Проте, ця таблиця може бути уточнена з огляду на нові дані про втрату за ознакою втрати цілісності, отримані за допомогою підходів, запропонованих у 5 розділі роботи [284, 290–

299]. Для комплексного дослідження було прослідковано закономірність залежності межі вогнестійкості залізобетонних ребристих плит від їхніх найбільш значущих геометричних параметрів, у цьому випадку – це осьова відстань арматурних стержнів до обігрівної поверхні панелі між ребрами плити та товщина панелі у комірці між ребрами плити [284, 293, 295].

Згідно із прийнятими припущенням межа вогнестійкості пов'язана із геометричними параметрами залізобетонних ребристих плит лінійною поліноміальною залежністю (6.1) [284, 290, 293, 295]:

У такому разі, для встановлення регресійної залежності такого типу застосовується матриця плану експерименту для побудування регресії, яка має вигляд табл. 6.1 [284, 300 – 303].

У табл. 6.8 наведені інтервали факторів для здійснення повного факторного експерименту [284, 293, 295].

Для отримання опорних даних для реалізації повного факторного експерименту були прийняті найбільш поширені конструктивні характеристики залізобетонних ребристих плит [284, 293, 295].

#### Таблиця 6.8

Інтервали варіювання факторів у повному факторному експерименті

Товщина панелі у комірці між			Осьова відстань арматурних стержнів			
ребрами плити, <i>H</i> , мм			до обігрівної поверхні панелі між			
			ребрами плити, <i>w</i> , мм			
Найменше	Соронис	Найбільше	Найменше	Сородия	Найбільше	
значення,		значення,	значення, <i>w</i> _	Середне	значення,	
<i>H</i> <sub>-1</sub>	значення, П <sub>0</sub>	$H_1$	1	значення, $W_0$	<i>w</i> <sub>1</sub>	
30	55	80	10	15	20	

Механічні характеристики бетону та арматурної сталі, а також геометричні характеристики арматури наведені у табл. 6.9 [284, 290–299].

#### Таблиця 6.9

#### Технічні дані щодо залізобетонної ребристої плити

Параметр	Одиниці	Величина	
	вимірювання		
Бетон			
Клас міцності	-	C 20/25	
Густина	кг/м <sup>3</sup>	2 400	
Границя міцності	МПа	20	
Коефіцієнт Пуассона		0,3	
Висота поздовжніх ребер	ММ	<i>H<sub>m</sub></i> = 300 мм	
Висота поперечних ребер	ММ	<i>H<sub>a</sub></i> = 140 мм	
Робоча арматура у поздовжніх р	ебрах		
Клас міцності	-	A400	
Границя міцності	МПа	400	
Діаметр	ММ	16	
Робоча арматура у поперечних р	ребрах		
Клас міцності	-	A400	
Границя міцності	МПа	400	
Діаметр	ММ	12	
Робоча арматура у панелі міжре	брами		
Клас міцності	-	A400	
Границя міцності	МПа	400	
Діаметр	ММ	8	
Прикладене навантаження на пл	иту		
Прикладене навантаження у	%	70	
відсотках від максимального			

Варіюючи відповідні параметри відповідно до матриці плану за табл. 6.1 та табл. 6.8 згідно з результатами проведених розрахунків за запропонованими математичними моделями уточненого розрахункового методу із застосуванням методу скінченних елементів, та використовуючи параметри з табл. 6.9, отримані дані для проведення повного факторного експерименту, які наведені у табл. 6.10 [284, 293, 295].

Таблиця 6.10

## Параметри пожеж у модельних приміщеннях під час повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування

Експериментальна ситуація	1	2	3	4
Межа вогнестійкості, U <sub>e</sub> , хв	46	26	33	18

У разі використання результатів повного факторного експерименту залізобетонної ребристої плити, наведених у табл. 6.10, було обчислено відповідні коефіцієнти регресійної залежності (6.1) за формулами (6.2) [284, 300–303].

При застосуванні формул (6.2), були обчислені коефіцієнти регресії для визначення межі вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, які зведені до табл. 6.11 [284].

Таблиця 6.11

Коефіцієнти регресії для визначення межі вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності

Коефіцієнти регресії (6.1)	<i>b</i> <sub>0</sub> ,	<i>b</i> <sub>1</sub> ,	<i>b</i> <sub>2</sub> ,	<i>b</i> <sub>3</sub> ,
Кодовані значення	30,75	5,25	8,75	1,25
Реальні величини	1,2	0,06	1,2	0,01

Побудована регресія дозволяє прослідкувати залежність межі вогнестійкості залізобетонних ребристих плит від товщини панелі у комірках між ребрами та осьової відстані арматурних стержнів у такій панелі [284, 293, 295]. Це зручно зробити за допомогою відповідної побудованої поверхні, яка представлена на рис. 6.4. На побудованій поверхні видно, що вона має майже точну плоску форму.



Рис. 6.4. Поверхня, яка відповідає залежності межі вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності від товщини панелі у комірках між ребрами та осьової відстані арматурних стержнів у панелі

Визначати межу вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за їхніми найбільш значущими конструктивними параметрами зручно, якщо використовувати номограму, яка зображена на рис. 6.5 [284].



Рис. 6.5. Номограми залежності межі вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за настанням граничного стану втрати цілісності від товщини панелі у комірках між ребрами та осьової відстані арматурних стержнів у панелі

В процесі аналізу результатів розрахункового оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності було порівняно значення межі вогнестійкості, визначеним за регресійною залежністю та за уточненим методом. При цьому було використано абсолютне відхилення та відносне відхилення як критерії адекватності обчислених результатів. Отримані дані в процесі аналізу адекватності розрахункових результатів за регресійною залежністю та балежністю подані у табл. 6.12 [284].

Результати аналізу адекватності, подані у табл. 6.12, вказують на те, що похибка розрахункового оцінювання вогнестійкості для залізобетонних ребристих плит, розрахованих за регресійною залежністю, є несуттєвою і отримана регресійна залежність може бути застосована для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності [284].

Таблиця 6.12

# Адекватність результатів оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних ребристих плит, визначених за регресійною залежністю

Межа	Межа вогнестійкості, Абсолютне		Відносне					
вогнестійкості,	обчислена за регресійною	відхилення,	відхилення,					
обчислена	залежністю, хв	XB	%					
за МСЕ, хв								
Товщина панелі між ребрами $h_s = 30$ мм, Осьова відстань $w_s = 15$ мм								
27,1	25,5	1,6	5,904					
Товщина плити H = 50 мм, Осьова відстань w = 15 мм								
32	29,7 2,3		7,188					
Товщина плити H = 80 мм, Осьова відстань w = 15 мм								
44	38	б	13,634					
Товщина плити H = 80 мм, Осьова відстань w = 20 мм								
48	46 2		4,167					

		Продовження таблиці 6.12		
Середнє значення				
-	-	2,975	7,724	

Завдяки застосуванню номограми, зображеної на рис. 6.5, була уточнена табл. 5.10, наведена у настанові EN 1992-1-2 [15]. Уточнена таблиця подана нижче у вигляді табл. 6.13 [284].

Таблиця 6.13

	Мінімальні розміри (мм)						
Стандартна вогнестійкість	Можливі сполучення ширини ребер <i>b<sub>min</sub></i> та осьової відстані <i>а</i>			Товщина <i>h<sub>s</sub></i> та осьова відстань <i>w<sub>s</sub></i> в полиці плити			
	$b_{min}=80$			$h_s = 30$	$h_s=50$		
REI 15	<i>a</i> =15			$w_s=15$	$w_{s} = 10$		
REL 30	$b_{min}=80$			$h_s=50$			
KLI 50	<i>a</i> =15			$w_s = 15$			
RFI 45	$b_{min}$ =80			$h_s=50$			
	<i>a</i> =15			$w_s = 25$			
REI 60	$b_{min}=100$	120	≥200	$h_s = 80$			
	<i>a</i> =35	25	15*	$w_s =$	10*		

Мінімальні розміри та осьові відстані для залізобетонних ребристих плит

Отже розроблена таблиця 6.13 дозволяє оцінювати вогнестійкість залізобетонних ребристих плит з врахуванням настання граничного стану за ознакою втрати цілісності [284].

6.4. Ієрархічна структура методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності

Проведені дослідження, результати яких описані у 5 розділі та у цьому розділі, дозволяють сформувати ієрархічний підхід до методів розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності [284, 290 – 299].

Основним інструментом для досягнення такого результату є запропоновані моделі утворення тріщин, які мають наскрізний характер. Загалом, ці моделі, що отримані у результаті узагальнення великого обсягу експериментальних та розрахунково-теоретичних даних, застосовуються для створення спрощених методів.

Згідно із настановами, що містять нормативні документи [15], ієрархічна система методів розрахункового оцінювання за втратою несучої здатності – це структура, в основі якої лежать спрощені методи, а на вершині – уточнені. Таку саму систему пропонується використовувати і для оцінювання вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності для ребристих плит [284]. На рис. 6.3 представлена ієрархічна система методів розрахункового оцінювання залізобетонних порожнистих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності, яка так само може бути застосовна і для залізобетонних ребристих плит [284].

#### 6.5. Висновки до розділу

Узагальнюючи отримані результати у цьому розділі, можна зазначити, що було вирішено актуальну науково-технічну задачу щодо розробки ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності в умовах впливу пожежі. Загалом було отримано такі основні результати:

• виявлено закономірності настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, що дозволило побудувати регресійну залежність класу вогнестійкості залежно від конструктивних параметрів конструкцій, зокрема:

- для порожнистих плит залежно від висоти перерізу (*H*) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні плити (*w*), що описується регресійною залежністю:  $U_e = 3,37 + 0,119 \cdot H + 1,01 \cdot w + 0,000625 \cdot H \cdot w$ ;

- для ребристих плит залежно від товщини перерізу панелі між ребрами ( $h_s$ ) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні панелі між ребрами ( $w_s$ ), що описується регресійною залежністю:  $U_e = 1,2 + 0,06 \cdot h_s + 1,2 \cdot w_s + 0,01 \cdot h_s \cdot w_s$ ;

• побудовані номограми для оцінювання межі вогнестійкості для залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності на основі отриманих закономірностей;

• розроблено довідникові таблиці для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит за втратою цілісності залежно від конструктивних параметрів конструкцій;

• на основі запропонованих підходів розроблено загальну ієрархічну систему розрахункових методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності для залізобетонних порожнистих та ребристих плит.

## РОЗДІЛ 7 ПРОЦЕДУРА РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНОЇ ІЄРАРХІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

7.1. Особливості використання ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій

Розроблена ієрархічна система методів розрахункового оцінювання [284] дозволяє визначати вогнестійкість горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій із використанням методів різного рівня складності та точності за настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

Реалізація табличного метода оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану втрати цілісності має найпростішій алгоритм. Як початкові дані використовується три основних параметри: *H* – товщина плити; *w* – осьова відстань арматурних стержнів до обігрівної поверхні; *REI* – клас вогнестійкості, який потрібно забезпечити [284].

Для реалізації алгоритму табличного метода використовується табл. 6.7. Для потрібного класу вогнестійкості вибирається відповідний рядок, в якому наведені мінімальні значення товщини плити та осьової відстані арматурних стержнів. Якщо реальні параметри більші, то потрібний клас вогнестійкості вважається забезпеченим.

Для реалізації алгоритму спрощеного методу розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану втрати цілісності із застосуванням математичних моделей утворення тріщин, описаних у 4 розділі, використовується комплекс початкових даних, поданих у табл. 7.1 [284].
Комплекс початкових даних для реалізації спрощеного метода оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним

Дані щодо матеріалів						
Клас	Клас	Закон		Закон	Закон зміни	
міцності	міцності	деформування		деформування	температурної	
бетону	арматури	бетону		арматури	деформації	
Дані щодо конструктивних параметрів						
Розміри	Геометрія		Дi	Діаметри та кількість арматурних		
плити	розташування			стержнів		
	арматури					
Дані щодо температурного розподілу у поперечному перерізі						
Номограма температурного розподілу						

станом втрати цілісності

При реалізації розрахунку за математичною моделлю (4.41)–(4.48) потрібно визначити розподіл температури по товщині плити, для цього використовується діаграма, яка рекомендована настановою у стандарті EN 1992-1-2 [15]. З її використанням можна визначити температуру арматурних стержнів та температури нагрівання внутрішніх шарів бетону плити [284].



Рис. 7.1. Номограма для визначення температурного розподілення у залізобетонній порожнистій плиті

Знижена міцність арматурної сталі визначається через формулу:

$$f_{s,\theta} = k_t(\theta) f_s, \tag{7.1}$$

де  $k_t(\theta)$  – коефіцієнт зниження міцності арматурної сталі на розтяг.

Середня знижена міцність арматурного ряду залежно від підвищених температур згідно із настановою [15] розраховується за формулою:

$$k_{\nu}(\theta) = \frac{\sum k_{i}(\theta_{i})}{n_{\nu}}, \qquad (7.2)$$

де  $k(\theta_i)$  – коефіцієнт зниження міцності *i*-того арматурного стержня залежно від температури  $\theta_i$ , що отримана за номограмою на рис. 7.1;

 $k_{v}(\theta)$  – середній коефіцієнт зниження міцності *v*-того арматурного ряду;

 $n_v$  – кількість арматурних стержнів у *v*-тому арматурному ряді.

Відстань *а* від нижньої поверхні розрахункового поперечного перерізу до центра тяжіння арматурного ряду можна обчислити за формулою:

$$a = \frac{\sum a_{\nu}k_{\nu}(\theta)}{\sum k_{\nu}(\theta)},\tag{7.3}$$

де *a<sub>v</sub>* – відстань від нижньої поверхні розрахункового поперечного перерізу до *v*-того арматурного ряду.

Якщо існують тільки два ряди, відстань *w* від нижньої поверхні розрахункового поперечного перерізу до центра тяжіння арматурного ряду може розраховуватись за такою формулою:

$$w = \sqrt{(a_1 a_2)}. \tag{7.4}$$

Якщо арматурні стержні мають різні площі та розміщені довільно, використовується наступна методика.

Середній опір сталі арматурної групи  $k(\varphi)f_{s,fi}$  залежно від підвищених температур може розраховуватись за виразом:

$$k(\varphi)f_{sd,fi} = \frac{\sum_{i} \left[k_{s}(\theta_{i})f_{s,i}A_{i}\right]}{\sum_{i} A_{i}},$$
(7.5)

де  $k_t(\theta_i)$  – коефіцієнт зниження міцності *i*-того арматурного стержня;  $f_{s,i}$  – розрахунковий опір *i*-того арматурного стержня;  $A_i$  – площа поперечного перерізу *i*-того арматурного стержня.

Відстань *w* від розрахункового поперечного перерізу до центра тяжіння арматурної групи розраховується за формулою (7.6).

$$w = \frac{\sum_{i} \left[a_{i}k_{s}(\theta_{i})f_{s,i}A_{i}\right]}{\sum_{i} \left[k_{s}(\theta_{i})f_{s,i}A_{i}\right]},$$
(7.6)

де  $a_i$  – відстань від розрахункового поперечного перерізу до осі і-того арматурного стержня.

Знижена міцність бетону у стисненій зоні плити визначається за формулою:

$$f_{ct,\theta} = k_c(\theta) f_{ct}.$$
(7.7)

Середній коефіцієнт зниження міцності бетону для перерізу елемента визначається за зонним методом, включно з коефіцієнтом (1-0,2/*n*), що враховує при розрахунку зміну температури кожної зони за формулою:

$$k_{c} = \frac{(1 - 0.2 / n)}{n} \sum_{i=1}^{n} k_{c,i}(\theta_{i}), \qquad (7.8)$$

де n – кількість зон (мінімально n = 3, рекомендовано n = 5).

Таким чином реалізація розробленого спрощеного методу може бути здійснена за алгоритмом, схема якого зображена на рис. 7.2 [284].



Рис. 7.2. Схема алгоритму реалізації методу для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити за граничним станом за ознакою втрати цілісності у разі появи поперечних тріщин

Для проведення розрахунку за цим методом також потрібний набір початкових даних, що поданий у вигляді табл. 7.1 [284].

Для реалізації алгоритму розрахункового оцінювання цілісності за виникненням поздовжніх тріщин може бути використана схема, подана на рис. 7.3 [284].



Рис. 7.3. Схема алгоритму реалізації методу для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити за граничним станом за ознакою втрати цілісності у разі появи поздовжніх тріщин

Обидва з викладених методів мають бути застосовані у комплексі, і якщо один з них дає негативний результат, вважається, що плита не відповідає встановленим вимогам щодо вогнестійкості за граничним станом за ознакою втрати цілісності.

Реалізація табличного метода оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності також як і порожнистих плит, мають найпростішій алгоритм [284]. Як початкові дані для таких конструкцій використовується чотири основних параметри:  $b_{min}$  – товщина ребра плити; a – осьова відстань арматурних стержнів ребра до обігрівної поверхні;  $h_s$  – товщина панелі плити між ребрами плити;  $w_s$  – осьова відстань арматурних стержнів ребра до обігрівної поверхні;  $h_s$  – товщина панелі до обігрівної поверхні; REI – клас вогнестійкості, який потрібно забезпечити [284].

Для реалізації алгоритму табличного методу використовується табл. 6.14 [284]. Для потрібного класу вогнестійкості вибирається відповідний рядок, в

якому наведені мінімальні значення товщини плити та осьової відстані арматурних стержнів. Якщо реальні параметри більші, то потрібний клас вогнестійкості вважається забезпеченим [284].

Для реалізації алгоритму спрощеного методу розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності використовується комплекс початкових даних як і для порожнистих плит, поданих у табл. 7.1 [284].

Для пошуку погонного граничного моменту у панелі між ребрами плити використовується зонний метод [15, 284]. Зонний метод полягає у розділенні перерізу на ушкоджені зони, не здатні опиратися силовій дії механічного навантаження та зони, які опираються механічним навантаженням на рівні ненагрітого бетону. Цей метод заснований на виконанні наступних процедур.

1. Переріз ділять на *n* паралельних зон однакової товщини, де *n*≥3.

2. Для кожної з зон визначається середня температура.

3. Визначається відповідний коефіцієнт зниження опору на стиск  $k_c(\theta_i)$  для кожною із зон за діаграмою зниження міцності бетону у залежності від температури.

4. Визначається середній коефіцієнт зниження для перерізу елементу, включно з коефіцієнтом (1-0,2/*n*), що враховує під час розрахунку зміну температури кожної зони за формулою (7.8).

5. Ширина пошкодженої зони перерізу елементів розраховується за формулою:

$$a_{z} = w \left[ 1 - \frac{k_{c,m}}{k_{c}(\theta_{M})} \right], \tag{7.9}$$

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

Після визначення ушкодженої зони, визначається зменшений переріз елемента. Властивості бетону у зменшеному перерізі відповідають бетону у ненагрітому стані. При розрахунку також враховується і арматурні стержні, навіть

якщо вони не входять до неушкодженої частини перерізу. За даними температури у арматурних стержнях враховується зниження міцності арматурної сталі.

Визначається температура арматурних стержнів у розтягнутій або стисненій зонах. Деякі стержні можуть виходити за межі приведеного поперечного перерізу, проте їх необхідно враховувати під час розрахунку критичної несучої здатності перерізу під час вогневого впливу. Далі визначається зменшена міцність арматури в залежності від температури згідно з діаграмами деформування.

Для розв'язання задачі визначення погонного граничного моменту застосовується метод додатку В.1 п. В.1.2 ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 [284]. На рис. 6.10 зображено основний принцип розрахунку несучої здатності поперечного перерізу як з розтягнутим, так і зі стиснутим армуванням [284].



Рис. 7.4. Розподіл напружень при критичної несучої здатності прямокутного залізобетонного перерізу зі стиснутим армуванням

Для розрахунку знижених характеристик бетону та арматурної сталі застосовуються формули (7.1) – (7.8).

Розрахунок згинального моменту поперечного перерізу може виконуватися за такими виразами [15, 284]:

$$M_{u1} = A_{s1} f_{sd,fi}(\theta_m) z,$$

$$\omega_k = \frac{A_{s1} f_{sd,fi}(\theta_m)}{b_{fi} d_{fi} f_{cd,fi}(20)},$$

$$M_{u2} = A_{s2} f_{scd,fi}(\theta_m) z,$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2},$$
(7.10)

де *A*<sub>s</sub> – загальна площа армування;

*f*<sub>sd,fi</sub> – розрахунковий опір армування на розтяг;

*f<sub>scd,fi</sub>* – розрахунковий опір армування на стиск;

*ω<sub>k</sub>* – коефіцієнт міцності армування поперечного перерізу у разі теплового впливу пожежі;

 $b_{fi}$  – ширина приведеного поперечного перерізу під час пожежі;

 $d_{fi}$  – робоча висота приведеного поперечного перерізу під час пожежі;

 $f_{cd,fi}$  – розрахунковий опір бетону на стиск (за нормальної температури);

*z* – відстань між розтягнутими арматурними стержнями;

z' – відстань від розтягнутого армування до стиснутого армування;

 $\theta_m$  – середня температура арматурного ряду.

Коли вплив моменту оцінюється як показано вище, повна здатність чинити опір моменту обчислюється за такою формулою:

$$M_u = M_{ul} + M_{u2}. (7.11)$$

Потім отримане значення порівнюється із моментом, що діє у конструкції згідно з розрахунковою схемою. Якщо обчислене значення моменту більше, це означує, що межа вогнестійкості не досягається.

При реалізації алгоритму розрахункового оцінювання вогнестійкості для ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності за енергетичним критерієм може бути використана схема, подана на рис. 7.5 [284].



Рис. 7.5. Схема алгоритму реалізації методу для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за граничним станом за ознакою втрати цілісності за енергетичним критерієм

Наступний щабель за ієрархією методів розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності зумовлює використання уточнених методів.

У розділах 4, 5 [247, 248, 293, 295] роботи показано, що вказані методи дозволяють за результатами проведених обчислювальних експериментів з використанням методу скінченних елементів ідентифікувати момент настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності на основі утворення наскрізних тріщин і дефектів, спричинених видаленням скінчених елементів у разі досягнення критичних пластичних деформацій. Реалізація такого методу може бути здійсненна за алгоритмом представленого на схемі для горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, так само, як для порожнистих та ребристих плит, що відображено рис. 7.6 [247, 248, 293, 295].



Рис. 7.6. Схема алгоритму реалізації уточненого методу вогнестійкості при неявному інтегруванні для залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності

Для проведення розрахунку за уточненим методом оцінювання вогнестійкості при неявному інтегруванні для залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності застосовуються основні математичні моделі та теоретичні посилання, наведені у табл. 7.2 [247, 248, 293, 295].

Таблиця 7.2

Основні методи чисельного дослідження цілісності залізобетонних порожнистих

#### плит в пожежі

Компонент математичної моделі	Використані методи розрахунку			
Теплотехнічна задача				
	Диференціальне нестаціонарне			
Теплопровілність	рівняння теплопровідності,			
геплопровідінств	апроксимоване методом скінчених			
	елементів [36, 247, 248, 293, 295]			

Продовження таблиці 7.2

	Метод Ньютона-Рафсона [36, 247,		
Фізична нелінійність	248, 293, 295]		
	Граничні умови III роду з		
	врахуванням конвекції та		
1 раничні умови	променистого теплообміну [36, 247,		
	248, 293, 295]		
Теплофізичні характеристики	Рекомендовані EN 1992-1-2 [15]		
Характеристики граничних умов	Рекомендовані EN 1992-1-2 [15]		
Статична задача			
	Метод скінченних елементів у		
Напружено-деформований стан	нелінійній реалізації [36, 247, 248,		
	293, 295]		
Плостиние леформирония	Асоціативна теорія пластичності [36,		
пластичие деформувания	247, 248, 293, 295		
	Критерій міцності бетону Віллема –		
критерій утворення тріщин	Варнке [36, 247, 248, 293, 295]		
	Метод Ньютона-Рафсона [36, 247,		
Фізична та геометрична нелінійність	248, 293, 295]		
Механічні та термомеханічні	Діаграми деформування,		
характеристикики	рекомендовані EN 1992-1-2 [15]		
Paga fu unarna ulara pafanuara	ANSYS Workbench, ANSYS APDL		
засоби програмного забезпечення	Mechanical, ABAQUS		

На вершині ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за граничним станом за ознакою втрати цілісності на схемі рис. 6.3 розташований метод, що використовує явне інтегрування рівнянь динаміки. У 2 розділі роботи показано, що такий метод також дозволяє за результатами розрахунку ідентифікувати момент настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності. Для проведення розрахунку за цим методом також потрібний набір початкових даних, що поданий у вигляді табл. 7.2. для проведення також застосовуються основні математичні моделі та теоретичні посилання, наведені у табл. 7.3.

Згідно із табл. 7.2, 7.3 для реалізації цього методу має бути спеціалізоване програмне забезпечення.

Таблиця 7.3

# Основні методи чисельного дослідження цілісності горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій в умовах пожежі

Компонент математичної моделі	Використані методи розрахунку		
Теплотехнічна задача			
	Диференціальне нестаціонарне рівняння		
Теплопровілність	теплопровідності, апроксимоване		
теплопровідшетв	методом скінчених елементів [36, 247,		
	248, 293, 295]		
	Граничні умови III роду з врахуванням		
Граничні умови	конвекції та променистого теплообміну		
	[36, 247, 248, 293, 295]		
	Метод Ньютона-Рафсона [36, 247, 248,		
Фізична нелінійність	293, 295]		
Теплофізичні характеристики	Рекомендовані EN 1992-1-2 [15]		
Характеристики граничних умов	Рекомендовані EN 1992-1-2 [15]		
Статична задача			
	Метод скінченних елементів у нелінійній		
Напружено-деформований стан	реалізації із явним інтегруванням рівнянь		
	динаміки [36, 246, 247, 248, 293, 295]		
Пластичне леформування	Асоціативна теорія пластичності [36, 247,		
пласти ше деформувания	248, 293, 295]		

Продовження таблиці 7.3

	1 / ,
	Модель бетону CSCM (Continuous
критери утворення трицин	Surface Cap Model) [247, 248, 293, 295]
Фізична та геометрична	Метод Ньютона-Рафсона [36, 247, 248,
нелінійність	293, 295]
Механічні та термомеханічні	Діаграми деформування, рекомендовані
характеристикики	EN 1992-1-2 [15]
Засоби програмного забезпечення	ANSYS LS-DYNA

Під час використання даного наступного за ієрархією метода застосовується алгоритм інтегрування рівнянь механіки за явним методом. При цьому інтегруються рівняння динаміки у загальній постановці. Такий метод дозволяє уникнути труднощів із збіжністю процесів. Також даний метод дозволяє отримати прямі ознаки настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

Описаний алгоритм також може бути здійснений за допомогою схеми, представленої на рис. 7.6.

Методика передбачає використання комп'ютерного моделювання з застосуванням скінченно-елементного аналізу, що дозволяє визначати напруженодеформований стан конструкцій в умовах пливу високих температур.

Застосування спрощених методів потребує проведення розрахунку, однак їх реалізація можлива без використання спеціалізованих програмних комплексів, що значно спрощує процес оцінювання. Ці методи враховують матеріали, з яких виготовлена конструкція, а також рівень прикладеного механічного навантаження. Водночас вони дозволяють лише перевірити відповідність або невідповідність необхідному класу вогнестійкості, але не дають змоги визначити межу вогнестійкості конструкцій, як це можливо у разі застосування уточнених методів.

Табличний метод реалізується шляхом порівняння геометричних параметрів конструкції, що значно спрощує його використання. Однак для гарантування

відповідності необхідному класу вогнестійкості в розробленому табличному методі не враховано матеріали, з яких виготовлена конструкція, а також рівень прикладеного механічного навантаження, як це можливо при використанні спрощених та уточнених методів. Тому це призводить до найбільш суворих вимог до вогнестійкості.

Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у створенні наукових основ для розробки методичної бази розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, зокрема залізобетонних порожнистих та ребристих плит за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності. Це відповідно дає можливість підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів шляхом точного визначення відповідності будівельних конструкцій вимогам щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Розроблена методична база може бути підґрунтям для удосконалення системи норм і стандартів для проєктування вогнестійких залізобетонних конструкцій за ієрархічною системою розрахункових методів, запропонованою у цій роботі, яка може бути органічно інтегрована у дані норми.

Розроблені методи апробовані та впроваджені у навчальний процес національного університету цивільного захисту України (Додаток Б), у проєктні та інспективні компанії: ДП «Державний науково-дослідний та проєктно – вишукувальний інститут «НДІпроектреконструкція» (Додаток В), ДП «Укрдержбудекспертиза» в Одеській області (Додаток Г), ТОВ «Незалежний аудит та інспектування сфери безпеки» (Додаток Ґ), ТОВ «КОМФОРТМЕД ПРОЄКТ» (Додаток Д) та ПП «ПроектБудСтар» (Додаток Е).

Впровадження розроблених методів дозволяє уникати неточностей, що виникали через недостатню точність або спрощення в існуючих підходах до оцінювання вогнестійкості. Це сприяє мінімізації ризику поширення вогню та проникнення підвищеної температури оточуючого середовища, токсичних продуктів згоряння і термічного розкладання, полум'я та іскри, диму через конструкції під час пожежі, що знижує ймовірність виникнення небезпечних ситуацій для людей та матеріальних цінностей.

Апробація запропонованих методів на практиці підтвердила їхню значущість та ефективність для підвищення рівня пожежної безпеки будівельних об'єктів і створення передумов для подальшого вдосконалення нормативної бази у сфері вогнестійкості.

# 7.2. Підвищення рівня пожежної безпеки будівельних об'єктів на основі удосконаленої системи оцінювання вогнестійкості

будівельних об'єктів Підвищення пожежної безпеки e одним 3 найважливіших завдань сучасного будівництва. Для досягнення цього завдання необхідно використовувати удосконалені методи оцінювання вогнестійкості конструкцій, які враховують складні термомеханічні та газодинамічні впливи, характерні для умов реальної пожежі. У рамках дисертаційного дослідження було методів розроблено ієрархічну систему розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, зокрема для порожнистих та ребристих плит, яка дозволяє підвищити рівень пожежної безпеки будівельних об'єктів.

Основою запропонованої системи є розробка універсальної методичної бази, що дозволяє враховувати вплив температурних градієнтів, теплопровідності матеріалів, термомеханічного руйнування бетону та арматури, а також особливості розподілу напружень і деформацій. Удосконалена система включає:

• комп'ютерне моделювання термічних процесів у конструкціях за стандартними температурними режимами пожежі;

• аналіз граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, пов'язаного з утворенням наскрізних тріщин та їх розвитком;

• використання уточнених критеріїв міцності бетону та арматури за високих температур.

Застосування цієї системи дозволяє отримати більш точні дані про поведінку залізобетонних ребристих та порожнистих плит під час пожежі, що сприяє підвищенню точності під час оцінювання їхньої вогнестійкості.

Запропоновані методи оцінювання вогнестійкості сприяють підвищенню рівня пожежної безпеки будівельних об'єктів шляхом:

1. Запобігання поширенню вогню: аналіз граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності дозволяє уникнути утворення наскрізних тріщин, через які можуть проникати небезчні чинники пожежі, що сприяє запобіганню їхньому поширенню між приміщеннями будівлі до настання втрати несучої здатності.

2. Забезпечення безпеки людей: завдяки підвищенню надійності конструкцій створюються умови для безпечної евакуації людей у разі пожежі, а також створення належних умов для роботи аварійно-рятувальних підрозділів протягом нормованого часу впливу пожежі.

3. Підвищення надійності об'єктів: удосконалені методи оцінювання дозволяють забезпечити відповідність будівельних об'єктів сучасним нормативним вимогам, що підвищує їхню загальну надійність і довговічність.

# 7.3. Висновки до розділу

Підсумовуючи результати, можна зазначити, що розробка та впровадження ієрархічної системи методів розрахункового оцінювання вогнестійкості горизонтальних залізобетонних конструкцій відкриває нові можливості для точного і ефективного визначення їхньої вогнестійкості. Використання сучасних технологій комп'ютерного моделювання, скінченно-елементного аналізу та математичних моделей забезпечує високий рівень точності в оцінках, враховуючи різноманітні термічні та механічні впливи, які можуть виникнути під час пожежі. Результати апробації цих методик у реальних умовах підтверджують їхню ефективність і важливість для покращення пожежної безпеки будівельних об'єктів та удосконалення нормативної бази. • Розроблені методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних залізобетонних конструкцій на основі комп'ютерного моделювання з використанням скінченноелементного аналізу, математичних моделей та табличних даних забезпечують визначення їхньої вогнестійкості, враховуючи термічні та механічні впливи в умовах впливу пожежі, за використанням методів різного рівня складності та точності;

• розроблені методи апробовані та успішно впроваджені в діяльність науководослідних, проєктних і освітніх установ, що підвищує ефективність проєктування вогнестійких конструкцій та знижує ризики поширення вогню;

• застосування методів дозволяє підвищити безпеку людей шляхом забезпечення безпечної евакуації та створення належних умов для роботи аварійно-рятувальних підрозділів, а також сприяє підвищенню надійності будівельних об'єктів;

• розроблені методи можуть бути основою для вдосконалення системи норм та стандартів проєктування вогнестійких конструкцій, що сприятиме зниженню ризиків пожеж та полегшить інтеграцію нових підходів у практику будівництва.

### ВИСНОВКИ

У результатах проведених досліджень, представлених у даній дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, описано етапи розв'язання актуальної наукової проблеми – створення передумов для розробки ієрархічної системи методів розрахункової оцінки вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, зокрема порожнистих і ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності шляхом розвитку теоретичних основ прогнозування утворення наскрізних тріщин і дефектів у таких типах конструкцій за відсутності крихкого руйнування під час пожежі. Виявлено закономірності утворення цих тріщин залежно від конструктивних параметрів даних елементів, а також розроблено систему критеріїв для фіксації цього граничного стану вогнестійкості за результатами розрахунків.

Основні наукові та практичні результати роботи зводяться до наступного.

1. У результаті аналізу методів оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій за умов впливу пожежі за настанням граничного стану за ознакою

втрати цілісності представлено, що існуюча система критеріїв експериментальних та розрахункових методів оцінки вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за вказаним граничним станом не дає змоги однозначно зафіксувати утворення наскрізних дефектів, а також відповідно, настання граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Перспективним напрямком розв'язання цієї проблеми є удосконалення та розвиток теоретичних уявлень про стан, коли тріщини в огороджувальних залізобетонних конструкціях стають наскрізними, із одночасним створенням на їх основі ефективних розрахункових методів оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій.

2. Розроблено методику та математичну модель для проведення математичного моделювання поведінки залізобетонних порожнистих плит під впливом пожежі з використанням явного методу інтегрування рівнянь напруженодеформованого стану деформованого твердого тіла. За результатами проведених розрахунків отримано дані, які дають можливість прогнозувати утворення та розвиток тріщин, які мають наскрізний характер у таких конструкціях.

Визначено, що механізм утворення поперечних тріщин пов'язаний із формуванням призми руйнування з кутом при вершині ~61°. Утворення цієї призми руйнування зафіксовано на 45-й хвилині впливу пожежі та пов'язано з утворенням косих поперечних тріщин, що може свідчити про настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності. Це передує настанню критичного прогину залізобетонної порожнистої плити (230,114 мм), а саме – настанню граничного стану вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності за 5 хвилин.

3. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах вогневих випробувань. Методика включає аналіз температурних показників, параметрів напруженодеформованого стану, а також дослідження передумов утворення та розвитку наскрізних тріщин, що можуть бути пов'язані з настанням граничного стану вогнестійкості за ознакою втрати цілісності в умовах впливу пожежі. За результатами досліджень встановлено, що граничний стан за ознакою втрати несучої здатності настає на 50-й хвилині через досягнення критичного прогину (230,114 мм) порожнистої плити.

Аналіз експериментальних даних підтвердив адекватність математичного моделювання поведінки залізобетонної порожнистої плити, розробленої за запропонованою методикою. Відносна похибка не перевищує 15 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення при рівні значущості 0,05.

Також встановлено, що утворення наскрізних тріщин відбувається в середній частині прольоту конструкції за механізмом утворення призми руйнування з кутом при вершині ~61°. Процес супроводжується активним зростанням висоти поперечних тріщин, починаючи з 35-ї хвилини, тобто за 15 хвилин до втрати несучої здатності. Крім того, виявлено механізм утворення поздовжніх наскрізних тріщин, які виникають унаслідок температурного розширення бетону та арматури в нижніх шарах залізобетонної порожнистої плити. Їх утворення зафіксовано на 46-й хвилині, що можна пов'язати з настанням граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

4. Розроблено математичні моделі та уточнено методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій. На відміну від існуючих, підходів, запропоновані моделі дозволяють врахувати настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності. Математичне моделювання утворення тріщин та/або дефектів виконано із застосуванням методу скінченних елементів із використанням неявного інтегрування рівнянь механіки та базуючись на виявлених механізмах руйнування залізобетонної порожнистої та ребристої плит. Шляхом візуального аналізу повністю отриманих розрахункових даних встановлюється положення зруйнованих скінченних елементів у бетоні. за рахунок отриманих критичних величин пластичних деформацій – 2,5 е-3, що дозволяє перевіряти умову появи наскрізних тріщин та/або дефектів, що призводять до настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності.

Встановлено, що при рівні навантаження 50 % від несучої здатності конструкцій наскрізні тріщини в порожнистих плитах утворюються внаслідок формування призми руйнування на 45-й хвилині, а поздовжні тріщини, спричинені температурним розширенням бетону та арматури у нижніх шарах плити, – на 44-й хвилині. Це на 5 та 6 хвилин відповідно передує втраті несучої здатності, що ставить під сумнів відповідність класу вогнестійкості REI 45, оскільки межа вогнестійкості, визначена за результатами вогневих випробувань, склала 50 хвилин. У ребристих плитах втрату цілісності зафіксовано на 23-й хвилині внаслідок локального деформування панелі в комірці між ребрами, що супроводжувалося утворенням лунок та локальних зон пластичної деформації вздовж їхніх границь. Водночас втрати несучої здатності через прогини основної несучої частини ребристої плити, тобто її поздовжніх ребер, протягом 30 хвилин впливу пожежі зафіксовано не було.

5. Розроблено спрощені методи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, засновані на визначенні критеріїв настання граничного стану за ознакою втрати цілісності:

• для порожнистих плит:

- розроблено математичну модель, що виражає критерій утворення поперечної тріщини. Ця модель дозволяє визначити глибину поширення тріщини відносно необігрівної поверхні плити. Якщо ця глибина тріщини перевищує товщину стінки між поверхнею плити та порожниною, це спричиняє настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності;

- розроблено математичну модель, що виражає критерій утворення поздовжньої тріщини, яка виникає внаслідок температурного розширення нижніх шарів плити. Модель дозволяє визначати напруження в розтягнутій зоні стінки між порожниною та поверхнею плити у верхній її частині. Отримане значення напруження порівнюється з межею міцності бетону на розтяг враховуючи її зниження через нагрівання. Якщо обчислене напруження перевищує межу міцності бетону на розтяг, фіксується утворення магістральної поздовжньої тріщини та настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності;

## • для ребристих плит:

- розроблено математичну модель, що визначає критерій утворення наскрізної тріщини. Критерієм настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності є енергетичний підхід, що базується на порівнянні віртуальних робіт внутрішніх та зовнішніх сил у полиці плити між ребрами, визначених за принципом можливих переміщень. Якщо величина віртуальних робіт зовнішніх сил перевищує величину віртуальних робіт внутрішніх сил, фіксується настання граничного стану за ознакою втрати цілісності залізобетонної ребристої плити.

6. Виявлено закономірності настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності для горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій, що дозволило створити регресійну залежність зміни межі вогнестійкості залежно від конструктивних параметрів конструкцій, зокрема:

- для порожнистих плит залежно від висоти перерізу (H) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні плити (w), що описується регресійною залежністю:  $U_e = 3,37 + 0,119 \cdot H + 1,01 \cdot w + 0,000625 \cdot H \cdot w$ ;

- для ребристих плит залежно від товщини перерізу панелі між ребрами (hs) та осьової відстані від арматури до обігрівної поверхні панелі між ребрами (ws), що описується регресійною залежністю:  $U_e = 1,2 + 0,06 \cdot h_s + 1,2 \cdot w_s + +0,01 \cdot h_s \cdot w_s$ .

Ці залежності стали основою для розробки табличного методу оцінювання вогнестійкості для залізобетонних порожнистих та ребристих плит за граничним станом за ознакою втрати цілісності, залежно від їхніх конструктивних параметрів.

7. Розроблено ієрархічну систему методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих та ребристих плит, яка відрізняється від існуючих підходів, закладених у другій частині Єврокоду 2. Наявна система враховує лише два граничні стани – втрату теплоізолювальної та несучої здатності, тоді як

розроблена система додатково враховує умови настання граничного стану за ознакою втрати цілісності.

Основою розробленої системи є табличний і спрощені методи, а на верхньому рівні – уточнені методи, які базуються на неявному та явному підходах до інтегрування рівнянь механіки деформованого тіла.

Розроблена система дозволяє забезпечити відповідність нормативним вимогам щодо вогнестійкості будівельних конструкцій та підвищує точність оцінювання вогнестійкості:

• на 12 % для порожнистих плит порівняно з результатами вогневих випробувань;

• на 16,1 % для ребристих плит порівняно з результатами математичного моделювання.

Розроблена система дає змогу отримувати уточнені дані щодо утворення наскрізних дефектів ще до настання втрати несучої здатності, що, своєю чергою, дозволяє більш точно оцінювати ризики втрати цілісності конструкцій під час пожежі. Такий підхід сприяє підвищенню рівня пожежної безпеки будівель, оскільки своєчасне виявлення критичних станів конструкцій дає змогу впроваджувати превентивні заходи.

8. Застосування розробленої системи методів сприяє підвищенню пожежної безпеки будівельних об'єктів завдяки точнішому оцінюванню вогнестійкості залізобетонних плит, зменшенню ризиків поширення вогню, створенню умов для безпечної евакуації людей під час пожежі, а також забезпеченню ефективної роботи рятувальних підрозділів у процесі її гасіння. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення нормативної бази у сфері проєктування вогнестійких конструкцій, що сприятиме підвищенню безпеки будівельних об'єктів та ефективності їх експлуатації.

#### ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. International Code Council. (2006). *International building code*. International Code Council.

2. BSI 96/540493 "The use of Fire Safety Engineering of Buildings" (Draft 27 march 1996).

3. CEN. (2002). *EN 1990: Eurocode – Basis of structural design*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.

4. National Fire Protection Association. (2006). *Building construction and safety code (NFPA 5000)*. National Fire Protection Association.

5. National Research Council of Canada. (1995). *National building code of Canada*. Ottawa: National Research Council of Canada.

6. American Institute of Steel Construction. (2005). *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-05)*. Chicago, IL: AISC.

7. Міністерство регіонального розвитку України. (2017). ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ: Мінрегіон України.

8. International Organization for Standardization. (1975). *Fire resistance tests— Elements of building construction (ISO 834 – 1975).* ISO.

9. Міністерство розвитку громад та територій України. (2021). ДБН В.1.2-7:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека.

10. European Committee for Standardization. (2002). *EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire.* Brussels: CEN.

11. European Committee for Standardization. (2004). EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels: CEN.

12. European Committee for Standardization. (2004). EN 1996-1-2:2004. Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels: CEN. 13. Standards New Zealand. (1991). Fire properties of building materials and elements of structure (Miscellaneous Publication No. 9). Wellington: SNZ.

14. Укрархбудінформ. (2012). ДСТУ-Н Б ЕN 1991-1-2:2012. Загальні дії. Частина 1-2. Загальні дії на конструкцію під час пожежі. Київ: Укрархбудінформ.

15. Укрархбудінформ. (2012). ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: Укрархбудінформ.

16. Укрархбудінформ. (2012). ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:2012. Проектування кам'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: Укрархбудінформ.

17. Міністерство розвитку громад та територій України. (2016). ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.

18. Укрархбудінформ. (2023). ДСТУ EN 1365-2:2023. Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 2. Перекриття та покриття (EN 1365-2:2014, IDT). Київ: Укрархбудінформ.

19. National Fire Protection Association. (2006). *Standard methods of tests of fire* endurance of building construction and materials (NFPA 251). Quincy, MA: NFPA.

20. Standards Association of Australia. (1990). Fire resistance tests of elements of structure (AS 1530.4-1990). SAA.

21. Underwriters Laboratories of Canada. (2004). *Standard methods of fire endurance tests of building construction and materials (CAN/ULC-S101-04)*. Toronto: ULC.

22. Укрархбудінформ. (2023). ДСТУ ЕN 1363-1:2023. Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT). Київ: Укрархбудінформ.

23. Укрархбудінформ. (2007). ДСТУ Б В.1.1-19-2007. Захист від пожежі. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість. Київ: Укрархбудінформ. 24. Укрархбудінформ. (2023). ДСТУ ЕN 1365-4:2023. Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 4. Колони (EN 1365-4:1999, IDT). Київ: Укрархбудінформ.

25. Укрархбудінформ. (2023). ДСТУ ЕN 1365-3:2023. Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 3. Балки (EN 1365-3:1999, IDT). Київ: Укрархбудінформ.

26. Harmathy, T. Z. (1976). Fire resistance versus flame spread resistance. *Fire Technology*, *12*(4), 290–302.

27. Milke, J. A. (2002). Analytical methods for determining fire resistance of steel members. In P. J. DiNenno (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd ed.). National Fire Protection Association.

28. Mehaffey, C., & Harmathy, T. Z. (1984). Failure probabilities of constructions designed for fire resistance. *Fire and Materials*, 8(2), 96–104.

29. Phan, L. T., McAllister, T. P., Gross, J. L., & Hurley, M. J. (2010). *Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings* (NIST Technical Note 1681). National Institute of Standards and Technology.

30. Galambos, T. V., Ravindra, M. K., & Ellingwood, B. R. (1982). Probabilitybased load criteria: Assessment of current design practice. *Journal of Structural Division ASCE*, *108*(5), 959–977.

31. Ellingwood, B. (1998). Reliability-based performance concept for building construction. In *Structural Engineering Worldwide: Proceedings of Structural Engineering World Congress 1998* (Paper T178-4). Elsevier.

32. Ellingwood, B. (2001). Acceptable risk bases for the design of structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, *3*(2), 170–179.

33. CIB W14. (1983). A conceptual approach towards a probability-based design guide on structural fire safety. *Fire Safety Journal*, *6*(1), 1–79.

34. Bennetts, I. D., & Thomas, I. R. (2002). Design of steel structures under fire conditions. *Progress in Structural Engineering and Materials*, *4*(1), 6–17.

35. Bailey, C. G. (2004). Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire. *Engineering Structures*, *26*(12), 1691–1703.

36. Поздєєв С.В. Розвиток наукових основ визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій: дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02 / Поздєєв Сергій Валерійович. – Черкаси, 2012. – 360 с.

37. Ministry of Internal Affairs. (1996). *Fire safety concepts offices and education buildings* (BIZA: 1996). The Hague, the Netherlands. (In Dutch).

38. ASTM. (2007). *Standard methods of fire tests of building construction and materials* (ASTM Standard E119-07a). American Society for Testing and Materials.

39. England, J. P., Young, S. A., Hui, M. C., & Kurban, N. (2000). *Guide for the design of fire-resistant barriers and structures*. Building Control Commission, Melbourne.

40. Feasey, R., & Buchanan, A. H. (2002). Post-flashover fires for structural design. *Fire Safety Journal*, *37*, 83–105.

41. Harmathy, T. Z. (1993). *Fire safety design and concrete*. Longman Scientific & Technical, Essex, England.

42. Law, M. (1983). A basis for the design of fire protection of building structures. *The Structural Engineer*, 61A(5).

43. Lie, T. T. (Ed.). (1992). *Structural fire protection* (ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 78). American Society of Civil Engineers, New York.

44. Lie, T. T. (2002). Fire temperature-time relations. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd ed., Ch. 4-8). Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, Md.

45. Magnusson, S. E., & Thelandersson, S. (1970). *Temperature-time curves of complete process of fire development: Theoretical study of wood fuel fires in enclosed spaces* (Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series 65)

46. Шналь Т.М. Розвиток наукових основ розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за умов впливу параметричних температурних режимів пожеж: дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02 / Шналь Тарас Миколайович. – Львів, 2019. – 394 с. 47. 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:ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2016. Том № 1. С. 38–43.

48. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Некора О. В., Сідней С. О. Математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні у ній повномасштабних вогневих випробувань. Збірник наукових праць:«Пожежна безпека». Львів: ЛДУ БЖД. 2020. Том №36. С. 121–130.

49. 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*. Київ: ІДУ НД ЦЗ. 2017. С. 55–56.

50. 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.

51. 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 mettalurgy, material engineering, production engineering and physics»*. Series: *Monografie №*6. Czestochowa. 2017. P. 439–444.

52. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Медвідь Б. А. Моделювання процесів нестаціонарного теплообміну при випробуваннях залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Збірник VI міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». Харків: НУЦЗУ. 2017. С. 142–143.

53. Сідней С. О., Несен І. С., Ромененко А. О., Сідней А. С. Дослідження впливу на показники значення межі вогнестійкості вертикальних залізобетонних будівельних конструкцій від дисперсії температур на їх обігрівальних поверхнях. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 58–59.

54. Lim, L., Buchanan, A. H., Moss, P. J., & Franssen, J.-M. (2004). Computer modeling of restrained reinforced concrete slabs in fire conditions. *ASCE Journal of Structural Engineering*, *130*(12), 1964–1971. https://doi.org/[номер DOI, якщо є]

55. Franssen, J.-M., et al. (1999). *Competitive steel buildings through natural fire safety concept* (Draft final report, Part 2). Profil Arbed Centre de Recherches.

56. Franssen, J.-M., Kodur, V. K. R., & Mason, J. (2002). User's manual for SAFIR2001: A computer program for analysis of structures at elevated temperature conditions. University of Liège.

57. Franssen, J.-M. (2002). A computer program for analysis of structures at elevated temperature conditions. University of Liège.

58. 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. *Scientific journal «Ecological Engineering & Environmental Technology»*. 2023. Vol. 24(4). P. 138–146.

59. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Lavrinenko L., Pozdieiev S. Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineralwool cladding. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2021. Vol. 5  $N_{2}$  1 (113). P. 24–32.

60. Nesen I., Sidnei S., Petukhova O., Zhuravskij M., Tishchenko E. Refining a tabular method for assessing the fire resistance of reinforced concrete structures. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2023. Vol. 4 № 7 (124). P. 72–78.

61. Shnal T., Pozdieiev S., Sidnei S., Shvydenko A. Determination of the Charring Rate of Timber to Estimate the Fire Resistance of Structures at Real Temperature Modes of Fires. *Proceedings of EcoComfort 2020 2nd International Scientific Conference «EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering»*. Cham: Springer. (*Scopus*). 2020. Vol.100. P. 409–418.

62. 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. *Збірник наукових праць: Геотехнічна механіка.* Дніпро: Інститут геотехнічної механіки ім. Н. Полякова НАН України. 2020. № 152. С. 116–126.

63. Hvozd V., Tishchenko E., Berezovskyi A., Sidnei S. Research of fire resistance of elements of steel frames of industrial buildings. *Scientific journal: «Materials Science Forum»*. Bäch: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1038. P. 506–513.

64. Поздєєв С. В., Сідней С. О., Гвоздь В. М., Тищенко О. М., Нуянзін О. М., Некора О. В., Шналь Т. М., Березовський А. І., Рудешко І. В., Федченко С. М., Неділько І. А. Достовірність результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін. Черкаси: *ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України*, 2021. 100 с.

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

66. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Березовський О. І. Дослідження впливу дизайну камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2017. С. 222–223.

67. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces

configurations. *MATEC Web of Conferences Volume 116*, 2017. 6th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud-2017). Kharkiv: USURT. 2017. P. 02027.

68. Pozdieiev S., Pidgoretskiy Y., Nekora O., Sidnei S., Tyshchenko O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *Conference Transport Technologies and Infrastructure Special*. Kharkiv: USURT. 2018. Vol. 7 № 4.3. P. 298–302.

69. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Сідней С. О. Удосконалення методу оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій в умовах температурного режиму пожежі, наближеного до реального. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2020. С. 194–195.

70. Zmaha M. I., Pozdieiev S. V., Zmaha Y. V., Nekora O. V., Sidnei S. O. Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2021)*. Kharkiv: USURT. 2021. Vol. 1021.P. 012031.

71. Kumar, S., & Welch, S. (2002). Natural fire safety concept – The development of a CFD-based engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures (7210-PR184).

72. Hietaniemi, J., Hostikka, S., & Vaari, J. (2004). FDS simulation of fire spread – Comparison of model results with experimental data.

73. Jansson, R., & Anderson, J. (2012). Experimental and numerical investigation of fire dynamics in a facade test rig. In *Proceedings of Fire Computer Modeling* (p. 247).

74. Поздєєв, С. В., Шеверєв, Є. Ю., Самченко, Т. В., [та ін.] (2018). Дослідження впливу пожежного навантаження на температурний режим пожежі у кабельному тунелі. *Науковий вісник УкрНДІЦЗ*, Київ, 13–20. 75. Dréan, V., Schillinger, R., & Auguin, G. (2016). Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPIR2 testing facility. *MATEC Web of Conferences, 46*, 03001. https://doi.org/[номер DOI, якщо  $\epsilon$ ]

76. Shnal, T., Pozdieiev, S., Yakovchuk, R., & Nekora, O. (2020). Development of a mathematical model of fire spreading in a three-storey building under full-scale fire-response tests. *Scientific Conference EcoComfort and Current Issues*.

77. Hasemi, Y., Yokobayashi, Y., Wakamatsu, T., & Ptchelintsev, A. (1995). Fire safety of building components exposed to a localized fire - Scope and experiments on ceiling/beam system exposed to a localized fire. In *ASIAFLAM* '95, Hong Kong.

78. Hasemi, Y., & Tokunaga, T. (1984). Flame geometry effects on the buoyant plumes from turbulent diffusion flames. *Fire Science and Technology*, *4*(1).

79. Schleich, J.-B., Cajot, L.-G., et al. (2003). Natural fire safety concept – Fullscale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool. *ECSC Research 7210-060, 1997-2000; Final Report 2003 - EUR 20580 EN*.

80. Ptchelintsev, A., Hasemi, Y., & Nikolaenko, M. (1995). Numerical analysis of structures exposed to localized fire. In *ASIAFLAM* '95, Hong Kong.

81. Сідней С. О., Березовський А. І., Касярум С. О., Частоколенко І. П. Дослідження поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2023. С. 147–148.

82. Sidnei S., Shnal T., Kholod P., Pozdieiev S. Forecasting the Behavior of Steel Beams with Corrugated Walls Under the Thermal Exposure of a Fire. In: Blikharskyy, Z. (eds) *Proceedings of EcoComfort 2022.EcoComfort 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham. 2022. Vol 290.P. 388–398.

83. Фомін, С. Л., Стельмах, О. А., & Джафар Шакер Шахін. (1996). Вогнестійкість центрально стислих залізобетонних елементів. *Пожежна безпека: Організаційно-технічне забезпечення*, (С. 78–81). Харків: ХІПБ МВС України.

84. Фомін, С. Л. (1997). Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища (Автореф. дис. на здоб. наук. ступеня докт. техн. наук, спец. 21.06.02 «Пожежна безпека»). Харків. 85. Фомін, С. Л. (1999). Моделювання тепло- та вологоперенесення в залізобетонних конструкціях при впливі кліматичного, технологічного та пожежного середовищ. *Електронне моделювання, 21*(4), 28–32.

86. Фомін, С. Л. (1997). Повна діаграма "σ-є" бетону та арматури при нагріванні. *Комунальне господарство міст. Республік. міжвідомчий наук.-техн.* збірник, (8), 27–29. Київ: Техніка.

87. Фомін, С. Л. (1996). Вогнестійкість та залишкова міцність залізобетонних конструкцій. У *Матеріали першої всеукраїнської науково- технічної конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону»* (С. 183–185). Київ.

88. Фомін, С. Л. (2005). Діаграма стану арматури для розрахунку залізобетонних конструкцій при нормальних та високих температурах. *Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. збірник*, (1), 372–379. Київ: НДІБК.

89. Фомін, С. Л. (2005). Вогнестійкість багатоповерхових каркасних будівель. *Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. збірник*, (2), 310–315. Київ: НДІБК.

90. Фомін, С. Л. (1992). Розрахунок залізобетонних конструкцій на температурно-вологісні впливи технологічного та кліматичного середовища (Навч. посібник). Київ: УМК ВО.

91. Григор'ян Б.Б. Вогнестійкість стиснутих залізобетонних елементів при температурних режимах, близьких до реальних: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.01 / Борис Бахшійович Григорян. - Х., 2001. - 168 с.

92. Демчина, Б. Г., & Коляков, М. І. (1996). До питання розрахунку вогнетривкості залізобетонних конструкцій. Збірник тез І Всеукраїнської науковотехнічної конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону», 99–101.

93. Жакін, І. А. (2004). *Несуча здатність сталебетонних колон при силових та інтенсивних температурних впливах* (Дисертація кандидата технічних наук, Харків).

94. Поздєєв, С. В., Григорян, Б. Б., & Поздєєв, А. В. (2005). Удосконалення експериментально-розрахункової методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних колон після пожежі. *Системи обробки інформації*, (7(47)), 133–143.

95. Поздєєв, С. В., Некора, О. В., & Поздєєв, А. В. (2006). Методика визначення режимів нагріву бетонних зразків, що моделюють стан елементів будівельних конструкцій під час пожежі. *Проблеми пожежної безпеки*, (19), 111–116.

96. Поздеєв, С. В., Некора, О. В., & Поздеєв, А. В. (2006). Обґрунтування вибору режимів нагріву зразків для експериментально-розрахункового методу визначення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*, (9), 125–132.

97. Поздєєв, С. В., Григорян, Б. Б., Некора, О. В., & Поздєєв, А. В. (2006). Обґрунтування методики розрахунку температурних режимів прогріву камери печі при комбінованих випробуваннях бетонних зразків. *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки*, (2(14)), 140–147.

98. Поздєєв, С. В., Некора, О. В., & Поздєєв, А. В. (2007). Обґрунтування експериментально-розрахункової методики визначення несучої здатності залізобетонної колони при пожежі. *Проблеми пожежної безпеки*, (21), 201–207.

99. Некора, О. В. (2006). Визначення несучої здатності залізобетонної колони під час пожежі розрахунково-експериментальним методом. *Вісник ЧДТУ*, (4), 15–20.

100. Некора, О. В. (2008). Розрахунково-експериментальний метод визначення вогнестійкості стиснених елементів залізобетонних будівельних конструкцій (Дисертація кандидата технічних наук, Черкаси).

101. Rackauskaite, E., Kotsovinos, P., & Rein, G. (2017). Model parameter sensitivity and benchmarking of the explicit dynamic solver of LS-DYNA for structural analysis in case of fire. *Fire Safety Journal, 90*, 123–138.

102. Law, A., Stern-Gottfried, J.,and Butterworth, N.: "A Risk Based Framework for Time Equivalence and Fire Resistance," Fire Technology, vol. 51, no. 4, pp. 771-784, 2014.

103. Kotsovinos, P., Walker, G., and Deeny, S.: "Reliability based fire severity assessment of modern buildings with open - plan spaces," in Conference Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Safety under Fire and Blast, CONFAB 2017, London, 2017.

104. Rackauskaite, E., Kotsovinos, P., Jeffers, A., and Rein, G.: "Structural Analysis of Multi-Storey Steel Frames Exposed to Travelling Fires and Traditional Design Fires," Engineering Structures, vol. 150, pp. 271-287, 2017.

105. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61.

106. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p.

107. Круковський, П. Г. (1998). Зворотні завдання тепломасоперенесення (Загальний інженерний підхід). Київ: НАНУ Інститут технічної теплофізики.

108. Грасснік, А., Грюн, Е., Фікс, Ст., Хольцапфель, Ст., & Ротер, Х. (1981). Попередження дефектів у будівництві. Захист матеріалів та конструкцій (В. П. Самойлов, пер. з англ.). 184 с.

109. Cirpici, B. K., Wang, Y. C., Rogers, B. D., & Bourbigot, S. (2016). A Theoretical model for quantifying expansion of intumescent coating under different heating conditions. *Polymer Engineering and Science*, *56*(7), 798–809

110. Sasani M. Progressive collapse resistance of reinforced concrete structures. Blast Mitigation. Springer, New York, NY. 2014. P. 331–350.

111. Жуков В.В. та ін. (1976). Вибухоподібне руйнування бетону Жуков, В. В., Гуляєва, В. Ф., & Сорокін, О. М. (1976). Вибухоподібне руйнування бетону. Вогнестійкість будівельних конструкцій, 4, 42–57.

112. Ройтман В.М. (1976). Оцінка вогнестійкості конструкцій Ройтман, В. М. (1976). Оцінка вогнестійкості конструкцій з урахуванням їхнього вибухоподібного руйнування. Вогнестійкість будівельних конструкцій, 4, 58–70.

113. Макагон В.А. (1976). Розрахунок температури у залізобетонних конструкціях. Макагон, В. А. (1976). Розрахунок температури у залізобетонних конструкціях. Вогнестійкість будівельних конструкцій, 4, 80–85.

114. Kodur, V. K. R. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. *International Scholarly Research Notices*, 2014, 1–12..

115. Novak, Z. S., Nefedchenko, L. M., & Abramiv, O. O. (2010). Metody vyprobuvan budivelnykh konstruktsii ta vyrobiv na vohnestrikist [Methods of testing building structures and products for fire resistance]. PozhInformTekhnika.

116. Burgess, I. W., Huang, S., & Staikova, S. (2014). A re-examination of the mechanics of tensile membrane action in composite floor slabs in fire. In *8th International Conference on Structures in Fire*, Shanghai, China.

117. Chen, F. C., & El-Metwally, S. E. D. (2011). Understanding structural engineering: From theory to practice. Broken Sound Parkway, NW: CRC Press.

118. Fletcher, I., Borg, A., Hitchen, N., & Welch, S. (2006). Performance of concrete in fire: A review of the state of the art, with a case study of the Windsor Tower fire. In *Proceedings of the 4th International Workshop in Structures in Fire*, Aveiro, Portugal, pp. 779–790.

119. Green, M., Butterworth, N., Burgess, I. W., & Plank, R. (2003). Practical case studies in performance-based structural fire engineering design. In *Designing Structures for Fire*. Baltimore: American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 259–269.

120. Newman, G. M., Robinson, J. T., & Bailey, C. G. (2000). Fire safe design – A new approach to multi-storey steel framed buildings, SCI-P288. Ascot, Berkshire, UK: Steel Construction Institute.

121. Szilard, R. (2004). Theories and applications of plate analysis: Classical, numerical, and engineering methods. WILEY.

122. Vassart, O., & Zhao, B. (2011). Fire resistance assessment of partially protected composite floors (FRACOF). The Steel Construction Institute (SCI).

123. Wang, Y., Burgess, I. W., Wald, F., & Gillie, M. (2012). Performance-based fire engineering of structures. Broken Sound Parkway, NW: CRC Press.

124. Lim, L., Buchanan, A., Moss, P., & Franssen, J.-M. (2004). Numerical modeling of two-way reinforced concrete slabs in fire. *Engineering Structures*, 26(8), 1081–1091.

125. Meacham, B. J. (1997). An introduction to performance-based fire safety analysis and design with applications to fire safety. In *Building to Last, Proc. Struct. Congress XV* (pp. 529–533). New York: American Society of Civil Engineers.

126. Payá-Zaforteza, I., & Garlock, M. E. (2010). A 3D numerical analysis of a typical steel highway overpass bridge under a hydrocarbon fire. In *Structures in Fire, Proceedings of the Sixth International Conference* (pp. 11–18).

127. Zenonas, K. (2007). Structural design of polymer protective coatings for reinforced concrete structure. Part II: Experimental verification. *Journal of Civil Engineering and Management*. ISSN: 1392-3730.

128. Yu, X. M., Huang, Z., Burgess, I. W., & Plank, R. J. (2008). Nonlinear analysis of orthotropic composite slabs in fire. *Engineering Structures*, *30*(1), 67–80.

129. Борсук, О. В., Поздєєв, С. В., Швиденко, А. В., & ін. (2020). Метод розрахункової оцінки можливості прогресивного руйнування будівель у наслідок пожежі. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука», 4*(84), 1 т., 74–80.

130. Борсук, О. В., Поздєєв, С. В., Нуянзін, О. М., & ін. (2020). Температурний вплив на теплофізичні властивості вогнезахисного мінераловатного облицювання сталевих конструкцій в умовах випробувань на вогнестійкість. *Східно-Європейський журнал передових технологій, 4*/12(106), 39– 45.

131. Борсук, О. В. (2020). Дослідження поведінки сталевої балки із вогнезахисним мінераловатним облицюванням при пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування: зб. наук. праць, 4*(1), 15–24. Черкаси: ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.
132. Борсук, О. В., Нуянзін, О. М., & ін. (2020). Дослідження межі вогнестійкості сталевої балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування: зб. наук. праць,* 4(2), 5–14. Черкаси: ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.

133. Wickström, U., & Palsson, J. (1999). A scheme for verification of computer codes for calculating temperature in fire-exposed structures. *SP Swedish National Testing and Research Institute*.

134. Shapiro, A. (2012). Using LS-DYNA for heat transfer & coupled thermalstress problems. *Livermore Software Technology Corporation*.

135. Temple, A., Walker, G., Flint, G., Panev, Y., & Kotsovinos, P. (2017). Verification of 2D heat transfer models developed in LS-DYNA for structural fire engineering applications. In *International Conference Applications of Structural Fire Engineering, ASFE'17*, Manchester.

136. Gillie, M. (2009). Analysis of heated structures: Nature and modelling benchmarks. *Fire Safety Journal*, 44, 673–680.

137. Zhao, B., Roosefid, M., & Vassart, O. (2008). Full-scale test of a steel and concrete composite floor exposed to ISO fire. In *Proceedings of the 5th International Conference on Structures in Fire*, Singapore.

138. Jansson, R. (2013). *Fire spalling of concrete* (Doctoral thesis, Concrete Structures, Stockholm, Sweden).

139. Kowalski, R., & Górska, B. (2005). Badanie zmian strukturalnych betonu narażonego na działanie wysokich temperatur. In *Materiały V Międzynarodowej Konferencji "Bezpieczeństwo pożarowe budowli"* (pp. 315–322).

140. Abrams, M. S., & Gustaferro, A. H. (1968). Fire endurance of concrete slabs as influenced by thickness, aggregate type, and moisture. *Research Department Bulletin No. 223.* Skokie, IL: Portland Cement Association.

141. Abrams, M. S., & Gustaferro, A. H. (1969). Fire endurance of two-course floors and roofs. *Journal of the American Concrete Institute*, *66*(2), February 1969.

142. Abrams, M. S., Gustaferro, A. H., & Salse, E. A. B. (1971). Fire tests of concrete joist floors and roofs. *RD Bulletin 006B*. Skokie, IL: Portland Cement Association.

143. ACI Committee 216. (1997). *Determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies* (ACI 216.1-97). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

144. Staikova, S. (2014). Development of a kinematically correct simplified fire resistance design process for composite floor systems in buildings (Doctoral thesis, The University of Sheffield).

145. Ahmed, G.N., and J.P. Hurst (1995), "Modeling the Thermal Behavior of Concrete Slabs Subjected to the ASTM E119 Standard Fire Condition," J. of Fire Protection Engineering 7:4 (1995) 125-132.

146. Ahmed, G. N., & Hurst, J. P. (1998). Validation and application of a computer model for predicting the thermal response of concrete slabs subjected to fire. *ACI Structural Journal*, *95*(5), 480–487.

147. Allen, D. E., & Lie, T. T. (1974). Further studies of the fire resistance of reinforced concrete columns. *Technical Paper No. 416, NRCC 14047*. Ottawa: National Research Council of Canada, Division of Building Research.

148. Bennetts, I. D. (1981). Elevated temperature behaviour of concrete and reinforcing steel. *Report No. MRL/PS23/81/001*. Clayton, Victoria, Australia: BHP Melbourne Research Laboratories.

149. Bobrowksi, J. (Ed.). (1978). Design and detailing of concrete structures for fire resistance: Interim guidance by a joint committee of the Institution of Structural Engineers and The Concrete Society. London: Institution of Structural Engineers.

150. Buchanan, A. (2001). Structural design for fire safety. New York: John Wiley & Sons.

151. Dotreppe, J.-C., Franssen, J.-M., & Vanderzeypen, Y. (1999). Calculation method for design of reinforced concrete columns under fire conditions. *ACI Structural Journal*, *96*(1), 9–20.

152. Harmathy, T. Z. (1970a). Thermal properties of concrete at elevated temperatures. *Journal of Materials*, 5(1), 47–74.

153. Harmathy, T. Z. (1970b). Thermal performance of concrete masonry walls in fire. *Fire Test Performance, ASTM 464*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 209–243.

154. Harmathy, T. Z. (1993). *Fire safety design & concrete*. New York: John Wiley & Sons.

155. Harmathy, T. Z., & Allen, L. W. (1973). Thermal properties of selected masonry unit concretes. *ACI Journal*, 70(2), 95–104.

156. Kodur, V. K. R. (2005). Guidelines for fire resistance design of highstrength concrete columns. *Journal of Fire Protection Engineering*, *15*(2), 93–106.

157. Lie, T. T. (1972). *Fire and buildings*. London: Applied Science Publishers, Ltd.

158. Lie, T. T. (1978). Calculation of the fire resistance of composite concrete floor and roof slabs. *Fire Technology*, *14*(1), 28–45.

159. Lie, T. T. (1992). *Structural fire protection*. Manual 78. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

160. Lie, T. T., & Allen, D. E. (1972). Calculations of the fire resistance of reinforced concrete columns. *NRCC 12797*. Ottawa: National Research Council of Canada, Division of Building Research.

161. Lie, T. T., & Woollerton, J. L. (1988). Fire resistance of reinforced concrete columns: Test results. *Internal Report No. 569*. Ottawa: National Research Council of Canada.

162. Lie, T. T., & Celikkol, B. (1991). Method to calculate the fire resistance of circular reinforced concrete columns. *ACI Materials Journal*, 88(1), 84–91.

163. Lie, T. T., & Irwin, R. J. (1993). Method to calculate the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross section. *ACI Structural Journal*, *90*(S7), 52–60.

164. Lie, T. T., & Kodur, V. K. R. (1996). Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, *122*(1), 30–36.

165. Lie, T. T., Lin, T. D., Allen, D. E., & Abrams, M. S. (1984). Fire resistance of reinforced concrete columns. *Technical Paper No. 378*. Ottawa: National Research Council of Canada, Division of Building Research.

166. Milke, J. A. (1999). Estimating fire performance of concrete and masonry structural members. *Proceedings of the 1999 Structures Congress*. Reston, VA: ASCE, 377–380.

167. Munukutla, V. R. (1989). Modeling of thermal performance of concrete walls. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, Department of Civil Engineering.

168. Pettersson, O., Magnusson, S. E., & Thor, J. (1976). *Fire engineering design of structures*. Publication 50, Swedish Institute of Steel Construction.

169. Phan, L. T. (1996). Fire performance of high-strength concrete: A report of the state of the art. *NISTIR 5934*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.

170. Phan, L. T., & Carino, N. J. (2001). Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures. *NISTIR 6726*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.

171. Phan, L. T., & Carino, N. J. (2003). Code provisions for high-strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures. *RILEM Materials and Structures*, *36* (March 2003), 91–98.

172. Phan, L. T. (2005). Pore pressure in high-strength concrete at high temperature. *Third International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications (ConMat '05)*, Vancouver, Canada, August 2005.

173. Phan, L. T. (2007). Spalling and mechanical properties of high-strength concrete at high temperature. *Proceedings of the 5th International Conference on Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading (CONSEC'07)*, Tours, France, June 2007, Vol. 2, pp. 1595–1608.

174. Phan, L. T. (2008). Pore pressure and explosive spalling in concrete. *RILEM Materials and Structures Journal* (Accepted for publication: January 2008). 175. Sanjayan, G., & Stocks, L. J. (1993). Spalling of high-strength silica fume concrete in fire. *ACI Structural Journal*, Technical Paper No. 90-M18 (March-April 1993), 170–173.

176. Shirley, S. T., Burg, R. G., & Fiorato, A. E. (1988). Fire endurance of highstrength concrete slabs. *ACI Materials Journal* (March-April 1988), 102–108.

177. Sterner, E., & Wickström, U. (1990). *TASEF—Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire*. Fire Technology SP Report 1990:05, Borås: Swedish National Testing Institute.

178. Tan, K. H., & Tang, C. Y. (2004). Interaction formula for reinforced concrete columns in fire conditions. *ACI Structural Journal*, Technical Paper No. 101-S03 (January-February 2004), 19–28.

179. Feng, M., & Wang, Y. (2005). An experimental study of loaded full-scale cold-formed thin-walled steel structural panels under fire conditions. *Fire Safety Journal*, 40, 43–63.

180. Feng, M., Wang, Y., & Davies, J. (2003). Axial strength of cold-formed thin-walled steel channels under non-uniform temperatures in fire. *Fire Safety Journal*, *38*, 679–707.

181. Feng, M., Wang, Y., & Davies, J. (2003). Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire. *Fire Safety Journal*, *38*, 365–394.

182. Fromy, P., & Curtat, M. (1999). Application of a zone model to the simulation of heat transfer in fire resistance furnaces piloted with thermocouples or plate thermometers. *Fire Safety Science – Proceedings of the Sixth International Symposium (IAFSS)*, 531–542.

183. Gewain, R., & Troup, E. (2001). Restrained fire resistance ratings in structural steel buildings. *AISC Engineering Journal*, 2001, AISC, Chicago, IL.

184. Gross, D., & Robertson, A. (1965). Experimental fires in enclosures. *Tenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 931–942.

185. Grosshandler, W. (2002). *Fire Resistance Determination and Performance Prediction Research Needs Workshop: Proceedings. NISTIR 6890*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

186. Harada, K., Yabuki, Y., & Terai, T. (1997). A theoretical consideration on heat transfer in fire resistance furnaces for furnace harmonization. *Fire Safety Science – Proceedings of the Fifth International Symposium (IAFSS)*, 1033–1044.

187. Башинська О. Довготривале руйнування бетону та арматури при високих температурах: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Башинська Олена. – Київ, 2019. – 180 с.

188. Мальована О.О. Міцність елементів із високоміцного бетону при зрізі:
дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Мальована Ольга Олександрівна. – Київ, 2020.
– 210 с.

189. Давидкін, Н. Ф., Каледін, В. О., & Страхов, В. Л. (2000). Оцінка вогнестійкості будівель та споруд на основі комп'ютерного моделювання. Математичне моделювання, (2000), 27–32.

190. Нуянзін, О. М., Кришталь, М. А., Кришталь, Д. О., & Тищенко, Є. О. (2017). Основи термодинаміки і теплопередачі для рятувальників. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.

191. Кулінченко, В. Р. (1999). *Довідник з теплообмінних розрахунків*. Київ: Техніка.

192. Бєляєв, В. І. (2001). Теплопровідність і теплообмін у будівельних конструкціях. Київ: Будівельник.

193. Гончаренко, В. В. (2010). Основи теплопередачі в будівельних матеріалах. Харків: ХНУБА.

194. Кожем'якін, В. М. (1998). *Теоретичні основи тепломасообміну*. Львів: Львівська політехніка.

195. Ляшенко, А. О. (2015). *Моделювання процесів теплопередачі у конструкційних матеріалах*. Дніпро: НМетАУ.

196. Петренко, П. П. (2007). *Теплофізичні властивості будівельних* матеріалів при високих температурах. Одеса: ОДАБА.

197. Тимошенко, О. Г., & Сергієнко, І. П. (2012). Вплив теплових навантажень на конструкційні матеріали. Вісник будівельної науки України, 3(27), 45–52.

198. Вліт, Ж. К., & Лайю, К. К. (1969). Експериментальне дослідження турбулентних прикордонних верств за умов природної конвекції. *Труди Американського товариства інженерів-хутро. Теплопередача. Серія 3*, 91(4), 73–96.

199. Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. L., & Sammakia, B. (1988). *Buoyancy-Induced Flows and Transport*. Hemisphere Publishing Corporation.

200. Глущенко, Л. Ф., & Романенко, Т. С. (1980). Дослідження теплообміну в області малих чисел Релея при змінному полі прискорень. Київ: УкрНДІНТІ.

201. Панченко, Н. А., & Халатов, А. А. (2017). Основи конвективного теплообміну: Методичні вказівки до практичних занять. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

202. Blundell, R., Diamond, C., & Browne, R. G. (1976). *The properties of concrete subjected to elevated temperatures*. Technical note No 9, CIRIA Underwater Engineering Group, London, UK.

203. Ковальов, А. I. (2006). Удосконалення методу оцінювання вогнезахисної здатності покривів залізобетонних перекриттів (Дис. канд. техн. наук). Черкаси.

204. Ковальов, А. І., Отрош, Ю. А., Коссе, А. Г., & Черненко, О. М. (2020). Залежність точності визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від параметрів моделі. *Проблемы пожарной безопасности*, (48), 63-70.

205. Круковський, П. Г. (2003). Розрахунково-експериментальний підхід до аналізу процесів тепломасообміну (методологія та приклади застосування). *Промислова теплотехніка (додаток до журналу)*, 25(4), 396-398.

206. Ковальов, А. І., Круковський, П. Г., & Качкар, Є. В. (2012). Визначення характеристик вогнезахисного покриття, що спучується, «Фенікс СТВ» за даними випробувань на вогнестійкість монолітного перекриття. Пожежна безпека: *теорія і практика*, (11), 43–51.

207. Круковський, П. Г., Ковальов, О. І., Черненко, К. А., Завірюха, М. А., & Абрамов, А. А. (2012). Моделювання теплового стану та вогнестійкості багатопустотного залізобетонного перекриття. *Пожежна безпека*, (21), 85-94.

208. Tamrazyan, A. G., Mineev, M. S., & Urasheva, A. (2020). Fire resistance of reinforced concrete corrosion-damaged columns of the "standard" fire. *Key Engineering Materials*, 828, 163–169.

209. Intertek Testing Services NA Inc. (2004). *Directory of listed products (ITS 2004)*. Cortland, N.Y.: Intertek Testing Services NA Inc.

210. Ioannides, S. A., & Mehta, S. (1997). Restrained vs. unrestrained fire ratings: A practical approach. *Modern Steel Construction*, (May 1997).

211. Jerath, V., Cole, K. J., & Smith, C. I. (1980). *Elevated temperature tensile properties of structural steels manufactured by the British Steel Corporation* (Report T/RS/1189/11/80/C). BSC Teesside Laboratories.

212. Kirby, B. (1983). The behaviour of structural steels manufactured by BSC under stress controlled anisothermal creep conditions (Report SH/RS/3664/4/83/B). BSC Sheffield Laboratories.

213. Kirby, B. (1999). The behaviour of multi-storey steel framed buildings in fires: A European joint research program. U.K.: British Steel Swinden Technology Centre.

214. Kirby, B. R., & Preston, R. (1988). High temperature properties of hotrolled, structural steels for use in fire engineering design studies. *Fire Safety Journal*, *13*, 27–37.

215. Kodur, V. K. R., & Harmathy, T. Z. (2002). Properties of building materials. In *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd ed.). Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers.

216. Василенко, С. М., Українець, А. І., & Олішевський, В. В. (2004). Основи тепломасообміну: Підручник. Київ: НУХТ.

217. Köster, W. (1948). Die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls reiner Metalle. Zeitschrift für Metallkunde, 39(1), 1–9.

218. Lane, B. (2000). Performance-based design for fire resistance. *Modern Steel Construction, December 2000.* 

219. Lawson, R. M., & Newman, G. M. (1990). *Fire resistant design of steel structures—A handbook to BS5950: Part 8* (SCI Publication 080). The Steel Construction Institute.

220. Lawson, R. M., & Newman, G. M. (1996). *Structural fire resistant design to EC3 & EC4, and comparison with BS 5950* (SCI Publication 080). The Steel Construction Institute.

221. Lawson, R. M., Oshatogbe, D., & Newman, G. M. (2002). *Design of Fabsec beams in non-composite and composite applications (including fire)*. Fabsec Limited.

222. Luecke, W. E., McColskey, J. D., McCowan, C. N., Banovic, S. W., Fields, R. J., Foecke, T., Siewert, T. A., & Gayle, F. W. (2005). *Federal building and fire safety investigation of the World Trade Center disaster: Mechanical properties of structural steel* (Technical Report NCSTAR 1-3D). National Institute of Standards and Technology. Available online at http://wtc.nist.gov.

223. Lund Institute of Technology. (1983). Properties of materials at high temperatures: Steel (Report LUTVDG/TVBB-3008). Sweden: Lund Institute of Technology.

224. Malhotra, H. L. (1982). *Design of fire-resisting structures*. Chapman and Hall.

225. Becker, R. J., & Buettner, D. R. (1985). Shear tests of extruded hollow core slabs. *PCI Journal, March-April*, 40-54.

226. Fellinger, J. H. H. (2004). *Shear and anchorage behaviour of fire-exposed hollow core slabs* (PhD Thesis). DUP Science (Delft University Press).

227. Hietanen, T. (1992). Fire tests for Finnish hollow core slabs. *Association of the Concrete Industry Finland* (Confidential report).

228. Felicetti, R., & Gambarova, P. G. (1998). On the residual properties of highperformance siliceous concrete exposed to high temperature. *Proceedings of the International Workshop in Honor of Z. P. Bažant's 60th Anniversary*, Prague, Czech Republic. 229. Felicetti, R., & Gambarova, P. G. (1999). On the residual tensile properties of high-performance siliceous concrete exposed to high temperature. *From Mechanics of Quasi-Brittle Materials and Structures*.

230. Fellinger, J. H. H. (1998). *Shear and anchorage behaviour of fire-exposed HC slabs* (Second interim report). TNO Building and Construction Research, Delft University of Technology, Technology Foundation STW, Delft.

231. Fellinger, J. H. H. (1999). *Shear and anchorage behaviour of fire-exposed HC slabs* (Third interim report). TNO Building and Construction Research, Delft University of Technology, Technology Foundation STW, Delft.

232. Huyghe, G. F., Walraven, J. C., & Stroband, J. (1980). *Research on extruded prestressed concrete hollow core slabs* (TU Delft Report 5-80-2). TU Delft, Stevin Laboratory Concrete Structures, Delft, The Netherlands.

233. Klein Holte, R. (1998). *Collection of standard shear tests on HC units*. Internal correspondence, VBI, Huissen, The Netherlands (Confidential).

234. Diederichs, U., Jumppanen, U.-M., & Schneider, U. (1995). Hightemperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete. *Proceedings of the Fourth Weimar Workshop on High-Strength Concrete: Material Properties and Design*, Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB), Weimar, Germany, October 1995.

235. Bangi, M. R. (2010). *Study on pore pressure spalling in hybrid fibre-high strength concrete at elevated temperatures* (Master's Thesis No. EG-M 80). Division of Environment and Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Hokkaido, Japan.

236. Bažant, Z., & Goangseup, Z. (2003). Decontamination of radionuclides from concrete by microwave heating. I: Theory. *Journal of Engineering Mechanics, July 2003*.

237. Bentz, D. B. (2000). Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, *97*(3), 351-359.

238. Brekelmans, J. W. P. M., Breunese, A., & Vervuurt, A. H. J. M. (2008). Research on spalling of concrete during fire – CUR, Newcon. *Report 2007-D-R1329 to* 2007-D-R1332, TNO, Delft, The Netherlands (test reports cited with permission).

239. Breunese, A. J., & Fellinger, J. H. H. (2004). Spalling of concrete – An overview of ongoing research in the Netherlands. *Workshop - Structures in Fire*, Ottawa, Canada.

240. Connolly, R. J. (1995). *The spalling of concrete in fires* (PhD thesis). Ashton University, Birmingham, United Kingdom.

241. Aagaard, B. T. (2000). *Finite-element simulations of earthquakes* (PhD thesis). California Institute of Technology, Pasadena, CA.

242. ANSYS, Inc. (2004). ANSYS structural analysis guide. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.

243. Belytschko, T., Chiapetta, R. L., & Bartel, H. D. (1976). Efficient largescale non-linear transient analysis by finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, *10*(1), 579-596. https://doi.org/XXXX

244. Hallquist, J. O. (2005). *LS-DYNA theory manual*. Livermore Software Technology Corporation, California, USA.

245. Bakeer, T. (2009). *Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions* (Publication Series of the Chair of Structural Design). TU Dresden.

246. Pozdieiev S., Sidnei S., Nekora O., Subota A., Kulitsa, O. Study of the Destruction Mechanism of Reinforced Concrete Hollow Slabs Under Fire Conditions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Kharkiv. 2023. P. 447–457.

247. Sidnei S., Myroshnyk O., Kovalov A., Veselivskyi R., Hryhorenko K., Shnal T., Matsyk I. Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2024. Vol. 4 № 7 (130). P. 70–77.

248. Сідней С. О., Тищенко О. М., Ковальов А. І., Григоренко К. В. Обґрунтування методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за втратою цілісності. *Науково-технічний збірник «Комунальне*  господарство міст». Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. 2024. Том. 6 №187. С. 218–223.

249. Данкевич І., Канюк В., Неділько І., Сідней А., Лозумирська А., Трошкін С., Сопільник В., Сідней С. Дослідження прогріву залізобетонної плити в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 23–24.

250. Гвоздь В., Тищенко О., Поздєєв С., Шналь Т., Луб'яний А., Сідней С. Оцінка вогнестійкості залізобетонних плит перекриттів за умов стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали XI Всеукраїнської науковопрактичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 88–90.

251. Сідней С. О., Кобко В. А., Федченко С. М., Змага М. І. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2022. Том 6 № 1. С. 95–103.

252. Поздєєв С., Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8 № 1. С. 91–100.

253. Поздєєв С. В., Березовський А. І., Неділько І. А., Сідней С. О. Обґрунтування спрощеного розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонної пустотної плити. *Матеріали IX Міжнародної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки»*. Одеса: ОДАБА. 2022. С. 155–157.

254. Sidnei S., Berezovskyi A., Nedilko I., Pozdieiev S. The improvement of the simplified calculation method for assessing the fire resistance of a hollow-core slab. *AIP Conf. Proc*. 2023. Vol. 2840 №1. P. 040004.

255. Сідней С. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті під час моделювання пожежі.

Науковий вісник: «Цивільний захист та пожежна безпека». Київ. ІДУ НД ЦЗ. 2024. № 1 (17). С. 93–102.

256. Сідней С. Вплив скінченно-елементної сітки на розподіл температур у плиті при пожежі. *XXIII Наукова конференція «Наукові підсумки 2024 року»*. *Збірка наукових тез*, Харків: Технологічний центр. 2024. С. 31.

257. Сідней С. О., Березовський А. І., Рудешко І. В., Іщенко І. І. Дослідження вогнестійкості порожнистої плити при пожежі за допомогою математичного моделювання. *Х Міжнародна конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки»*. Одеса. 2024.

258. Поздєєв С., Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Іщенко І. Дослідження настання граничних станів з вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 254–255.

259. Sidnei S. O., Nuianzin O. M., Kostenko T. V., Berezovskyi A. I., Wąsik W. A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. Sumy: Sumy State University. 2023. Vol.10 №2. P. D1–D7.

260. Сідней С. О., Кударенко К. С. Перевірка впливу вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2018. С. 134–135.

261. Кударенко К. С., Горобець В. О., Поздєєв С. В., Сідней С. О. Розрахунок оцінки пожежної небезпеки у внутрішньому просторі електричної шафи запорізької атомної електричної станції. *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика»*, Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2018. С. 31–34.

262. Сідней С., Ткаченко Є. Визначення залежності між значенням межі залізобетонних будівельних конструкцій вогнестійкості вертикальних i дисперсією температур ïх обігрівальних поверхнях. Матеріали XI на Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2020. С. 207–208.

263. Сідней С. О., Ткаченко Є. Г., Горбач Г. І., Сідней А. С. Визначення впливу вимірювальних приладів на достовірність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій. *Матеріали X Всеукраїнської науково*практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2020. С. 215–217.

264. Murray, Y. D., Abu-Odeh, A., & Bligh, R. (2006). *Evaluation of concrete material model 159* (FHWA-HRT-05-063). U.S. Federal Highway Administration.

265. Івашенко, Ю. А., & Лобанов, А. Д. (1984). Дослідження процесу руйнування бетону за різних швидкостей деформування. *Бетон та залізобетон,* (11), 25–35.

266. Здоренко, В. С. (1976). Розрахунок залізобетонних конструкцій з урахуванням утворення тріщин методом кінцевих елементів. *Опір матеріалів та теорія споруд, (29)*, 89–101.

267. Карпенко, Н. І., & Клованич, С. Ф. (1983). Визначальні співвідношення для залізобетону із тріщинами при термосилових впливах. *Будівельна механіка та розрахунок споруд, (2)*, 141–165.

268. Клованич, С. Ф., & Мироненко, І. М. (2007). *Метод кінцевих елементів* у механіці залізобетону (Монографія). Одеса: ОНМУ.

269. Перельмутер, О. В., & Слівкер, В. І. (2002). Розрахункові моделі споруд та можливість їхнього аналізу. Київ: Вид-во "Сталь".

270. Бамбура, О. М. (1996). Розвиток методів оцінки напруженодеформованого стану та несучої здатності залізобетонних конструкцій на основі реальних діаграм деформування матеріалів. *Науково-практичні проблеми*  сучасного залізобетону: Матеріали першої всеукраїнської науково-технічної конференції, Київ, 36–39.

271. Khoury, G. A. (2000). Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429-447.

272. Harmathy T. Z. (1970). Fire Resistance of Reinforced Concrete Structures.

273. Alskeif, A. (2015). Development of a mechanically correct fire resistance design process for composite floor systems in buildings (Master's thesis).

274. Pozdieiev S., Nekora O., Kryshtal T., Sidnei S. and Shvydenko A. Improvement of the estimation method of the possibility of progressive destruction of buildings caused by fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Kharkiv: USURT. 2019. Vol. 708. P. 012067.

275. Pozdieiev, O. Nekora, T. Kryshtal, V. Zazhoma and S. Sidnei. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire. *MATEC Web Conf.* Kharkiv: USURT. 2018. 02026.

276. Menzies, J. V. (1993). Improving structural safety through feedback. *The Structural Engineer*, 71(21).

277. Vambersky, J. N. J. A. (1994). Precast concrete in buildings today and in the future. *The Structural Engineer*, 72.

278. Hearn, D., & Baker, M. P. (2003). *Computer Graphics with OpenGL* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

279. Hicks, C. R. (1993). *Fundamental Concepts in the Design of Experiments* (5th ed.). Oxford: Oxford University Press.

280. Montgomery, D. C. (2019). *Design and Analysis of Experiments* (10th ed.). Wiley.

281. 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. Trans Tech Publications Ltd. 2020. T. 1006. P. 107–116.

282. Pozdieiev S., Sidnei S., Hvozd V., Tyshchenko O., Shnal T. Study of fire resistance of reinforced concrete slabs under thermal influence based on the use of the

parametric temperature fire modes. *Proceedings of the 9th International scientific conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structure and Buildings» (TransBud 2021).* Kharkiv. 2023. Vol. 2684 № 1. P. 030035-1-030035-8.

283. Гвоздь В., Некора О., Сідней С., Неділько І., Федченко С., Тищенко Є. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з урахуванням рівня механічного навантаження. Збірник наукових праць:«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. Том 5 № 1. С. 40–49.

284. Sidnei S., Pelypenko M., Grygorian M., Kropyva M., Taran I., Holovchenko S. Hierarchical structure of calculation methods for assessing the fire resistance of enclosure horizontal structures under the limit state of loss of integrity. Scientific monograph «Assessment of technical condition: means of measurement, safety, risks». *Technology center*. 2024. P. 64–96.

285. Банщиков С. О., Сідней С. О., Рудешко І. В. Дослідження розподілу температури по залізобетонній колоні при впливі стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених: «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. Харків: НУЦЗУ. 2023. С. 12.

286. 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*. Bristol: IOP Publishing Ltd. 2021. Vol. 1021. № 1. P. 012023.

287. Сідней С. Розробка методики розрахунку розподілу температури у плоских залізобетонних плитах при пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. Том 5 № 2. С. 83–88.

288. Поздєєв С., Березовський А., Рудешко І., Костенко Т., Сідней С. Дослідження ефективності ієрархічного підходу щодо розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних балок за Єврокодом 2. *Збірник наукових*  праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. Том 7 № 1. С. 99–106

289. Березовський А. І., Сідней С. О., Рудешко І. В. Оцінка ефективності матеріалів для герметизації пустот будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць: «Науковий вісник будівництва»*. Харків: ХНУБА. 2019. Том 98 №4. С. 287–294.

290. Sidnei S., Berezovskyi A., Kasiarum S., Chastokolenko I. Revealing patterns in the behavior of a reinforced concrete slab in fire based on determining its stressed and deformed state. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2023. Vol. 5 № 7 (125). P. 43–49.

291. Сідней С., Рудешко І., Іщенко І., Іваненко О., Степаненко В. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по ребристій плиті при моделюванні пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8 № 2. С. 121–132.

292. Рудешко I., Заїка Н., Куліца О., Сідней С. Дослідження ребристої залізобетонної панелі покриття за умовами стандартного температурного режиму пожежі. Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2022. Том 6 № 2. С. 94–101.

293. Sidnei S., Gonchar S., Zhuravskij M., Matsyk I., Nozhko I., Petukhova O., Shnal T., Vykhrystenko V. Defining a pattern in the loss of integrity by ribbed plates under fire conditions. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2024. Vol. 5 № 7 (131). P. 15–24.

294. Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Костенко Т., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної ребристої плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси:ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. Том 7 № 2. С. 217–226. 295. Сідней С. О. Уточнений метод оцінювання вогнестійкості ребристих плит за втратою цілісності. *Збірник наукових праць:«Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2024. Том 40 № 2. С. 139–153.

296. Vranay F., Zelenakova M., Nekora O., Sidnei S. Determination of temperature distribution in a ribbed reinforced concrete slab under the thermal influence of fire. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*, Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. С. 100–102.

297. Зуєнко М., Брусліновська П., Самойленко М., Сулейманов А., Сідней С. Дослідження залізобетонної ребристої плити під час оцінювання вогнестійкості за втратою несучої здатності. *XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів: ЛДУ БЖД.2024. С. 161–164.

298. Сідней С., Рудешко І., Романенко Д., Зуєнко М. Дослідження закономірності впливу навантаження на вогнестійкість ребристій залізобетонній плиті. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 134–136.

299. Сідней С., Тейзе А., Рудешко І. Дослідження втрати несучої здатності залізобетонної ребристої плити під час впливу пожежі. *Надзвичайні ситуації:* безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 136–138.

300. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Dankevych I., Pozdieiev S. Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2021. Vol. 6 № 7 (114). P. 59–67.

301. Некора В. С., Сідней С. О., Шналь Т. М., Некора О. В. Поведінка сталезалізобетонної плити при пожежі. *Матеріали міжнародної науково*-

практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій». Харків: НУЦЗУ. 2022. С. 34–35.

302. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O. The Improvement of the Method to Determine the Temperature in Steel Reinforced Concrete Slabs in Assessment of their Fire Resistance. *Scientific journal «Materials Science Forum»*. Bäch: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1066. P. 216–223.

303. Поздєєв С. В., Несен І. С., Сідней С. О. Оцінка вогнестійкості залізобетонного маршу сходової клітини. Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення». Львів: ЛДУ БЖД. 2022. С. 132–134.

# додатки

## ДОДАТОК А. СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Наукові праці, у 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 ma/aбo WebofScienceCoreCollection

1. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Dankevych I., Pozdieiev S. Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2021. Vol. 6. № 7 (114). P. 59–67.

2. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Lavrinenko L., Pozdieiev S. Thermal effect of a fire on a steel beam with corrugated wall with fireproof mineralwool cladding. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2021. Vol. 5.  $N_{2}$  1 (113). P. 24–32.

3. Nesen I., **Sidnei S.**, Petukhova O., Zhuravskij M., Tishchenko E. Refining a tabular method for assessing the fire resistance of reinforced concrete structures. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2023. Vol. 4. № 7 (124). P. 72–78.

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. *Scientific journal «Ecological Engineering & Environmental Technology»*. 2023. Vol. 24(4). P. 138–146.

5. Sidnei S., Berezovskyi A., Kasiarum S., Chastokolenko I. Revealing patterns in the behavior of a reinforced concrete slab in fire based on determining its stressed and deformed state. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2023. Vol. 5. № 7 (125). P. 43–49.

6. **Sidnei S.**, Myroshnyk O., Kovalov A., Veselivskyi R., Hryhorenko K., Shnal T., Matsyk I. Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2024. Vol. 4. № 7 (130). P. 70–77.

7. Sidnei S., Gonchar S., Zhuravskij M., Matsyk I., Nozhko I., Petukhova O., Shnal T., Vykhrystenko V. Defining a pattern in the loss of integrity by ribbed plates under fire conditions. *Scientific journal «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies»*. 2024. Vol. 5.  $N_{2}$  7 (131). P. 15–24.

#### Монографія

8. **Sidnei S.**, Pelypenko M., Grygorian M., Kropyva M., Taran I., Holovchenko S. Hierarchical structure of calculation methods for assessing the fire resistance of enclosure horizontal structures under the limit state of loss of integrity. Scientific monograph «Assessment of technical condition: means of measurement, safety, risks». *Technology center*. 2024. P. 64–96.

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

9. 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: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2016. Том № 1 (1). С. 38–43.

10. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Некора О. В., Сідней С. О..Математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні у ній повномасштабних вогневих випробувань. Збірник наукових праць:«Пожежна безпека». Львів: ЛДУ БЖД. 2020. Том №36. С. 121–130.

11. Гвоздь В., Некора О., Сідней С., Неділько І., Федченко С., Тищенко Є. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з урахуванням рівня механічного навантаження. *Збірник наукових*  *праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. Том 5. № 1. С. 40–49.

12. Сідней С. Розробка методики розрахунку розподілу температури у плоских залізобетонних плитах при пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. Том 5. № 2. С. 83–88.

13. Сідней С. О., Кобко В. А., Федченко С. М., Змага М. І. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2022. Том 6. № 1. С. 95–103.

14. Рудешко I., Заїка Н., Куліца О., Сідней С. Дослідження ребристої залізобетонної панелі покриття за умовами стандартного температурного режиму пожежі. Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2022. Том 6. № 2. С. 94–101.

15. Поздєєв С., Березовський А., Рудешко І., Костенко Т., Сідней С.Дослідження ефективності ієрархічного підходу щодо розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних балок за Єврокодом 2. *Збірник наукових праць:«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. Том 7. № 1. С. 99–106.

16. Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Костенко Т., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної ребристої плити. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. Том 7. № 2. С. 217–226.

17. Сідней С. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті під час моделювання пожежі. *Науковий вісник: «Цивільний захист та пожежна безпека»*. Київ. ІДУ НД ЦЗ. 2024. № 1 (17). С. 93–102.

18. Поздєєв С., Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити. *Збірник наукових*  *праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8. № 1. С. 91–100.

19. Сідней С. О., Тищенко О. М., Ковальов А. І., Григоренко К. В. Обґрунтування методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за втратою цілісності. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. 2024. Том 6. №187. С. 218–223.

20. Сідней С., Рудешко І., Іщенко І., Іваненко О., Степаненко В. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по ребристій плиті при моделюванні пожежі. *Збірник наукових праць: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8. № 2. С. 121–132.

21. Сідней С. О. Уточнений метод оцінювання вогнестійкості ребристих плит за втратою цілісності. *Збірник наукових праць:«Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2024. Том 40. № 2. С. 139–153.

#### Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

22. Березовський А. І., Сідней С. О., Рудешко І. В. Оцінка ефективності матеріалів для герметизації пустот будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць: «Науковий вісник будівництва»*. Харків: ХНУБА. 2019. Том 98. №4. С. 287–294.

23. 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. Trans Tech Publications Ltd. 2020. T. 1006. P. 107–116. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

24. Shnal T., Pozdieiev S., Sidnei S., Shvydenko A. Determination of the Charring Rate of Timber to Estimate the Fire Resistance of Structures at Real Temperature Modes of Fires. *Proceedings of EcoComfort 2020 2nd International Scientific Conference «EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering»*. Cham: Springer. 2020. Vol. 100. P. 409–418. (*Видання включено до наукометричної бази Scopus*).

25. 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. *Збірник наукових праць: Геотехнічна механіка*. Дніпро: Інститут геотехнічної механіки ім. Н. Полякова НАН України. 2020. № 152. С. 116–126.

26. Hvozd V., Tishchenko E., Berezovskyi A., Sidnei S. Research of fire resistance of elements of steel frames of industrial buildings. *Scientific journal: «Materials Science Forum»*. Bäch: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1038. P. 506–513. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

27. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O. The Improvement of the Method to Determine the Temperature in Steel Reinforced Concrete Slabs in Assessment of their Fire Resistance. *Scientific journal «Materials Science Forum»*. Bäch: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1066. P. 216–223. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

28. Sidnei S. O., Nuianzin O. M., Kostenko T. V., Berezovskyi A. I., Wąsik W. A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. Sumy: Sumy State University. 2023. Vol. 10. №2. P. D1–D7. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

#### Монографія

29. Поздєєв С. В., Сідней С. О., Гвоздь В. М., Тищенко О. М., Нуянзін О. М., Некора О. В., Шналь Т. М., Березовський А. І., Рудешко І. В., Федченко С. М., Неділько І. А. Достовірність результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін. Черкаси: *ЧІПБ імені Героїв* Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. 100 с.

Матеріали науково-практичних конференцій, що засвідчують апробацію дисертації

30. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Поздєєв С. В. Обчислювальний експеримент по дослідженню рівномірності прогріву несучої залізобетонної стіни

при її випробуваннях на вогнестійкість. Матеріали Міжнародної науковопрактичної конференції Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: матеріали. Львів: ЛДУ БЖД. 2016. С. 511–512.

31. 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*. Київ: ІДУ НД ЦЗ. 2017. С. 55–56.

32. 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.

33. 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 mettalurgy, material engineering, production engineering and physics». Series: Monografie №6. Czestochowa. 2017. P. 439–444.* 

34. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Медвідь Б. А. Моделювання процесів нестаціонарного теплообміну при випробуваннях залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Збірник VI міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». Харків: НУЦЗУ. 2017. С. 142–143.

35. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Березовський О. І. Дослідження впливу дизайну камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2017. С. 222–223.

36. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. *MATEC Web of Conferences Volume 116, 2017. 6th International* 

Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2017). Kharkiv: USURT. 2017. P. 02027. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

37. Кударенко К. С., Горобець В. О., Поздеев С. В., Сідней С. О. Розрахунок оцінки пожежної небезпеки у внутрішньому просторі електричної шафи запорізької атомної електричної станції. *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика»*, Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2018. С. 31–34.

38. Сідней С. О., Кударенко К. С. Перевірка впливу вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2018. С. 134–135.

39. Pozdieiev S., Nekora O., Kryshtal T., Zazhoma V. and Sidnei S. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire. *MATEC Web Conf.* Kharkiv: USURT. 2018. P. 02026. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

40. Pozdieiev S., Pidgoretskiy Y., Nekora O., **Sidnei S.,** Tyshchenko O. Research of Explode Exposure at the Relief Vent System Structures with Soft Transparent Material. *Conference Transport Technologies and Infrastructure Special*. Kharkiv: USURT. 2018. Vol. 7 № 4.3. P. 298–302.

41. Pozdieiev S., Nekora O., Kryshtal T., **Sidnei S.** and Shvydenko A. Improvement of the estimation method of the possibility of progressive destruction of buildings caused by fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Kharkiv: USURT. 2019. Vol. 708. P. 012067. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

42. Сідней С., Ткаченко Є. Визначення залежності між значенням межі вогнестійкості вертикальних залізобетонних будівельних конструкцій і дисперсією температур на їх обігрівальних поверхнях. *Матеріали XI*  Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2020. С. 207–208.

43. Сідней С. О., Ткаченко Є. Г., Горбач Г. І., Сідней А. С. Визначення впливу вимірювальних приладів на достовірність результатів випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій. *Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2020. С. 215–217.

44. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Сідней С. О. Удосконалення методу оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій в умовах температурного режиму пожежі, наближеного до реального. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2020. С. 194–195.

45. Zmaha M. I., Pozdieiev S. V., Zmaha Y. V., Nekora O. V., Sidnei S. O. Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2021)*. Kharkiv: USURT. 2021. Vol. 1021.P. 012031. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

46. Сідней С. О., Несен І. С., Ромененко А. О., Сідней А. С. Дослідження впливу на показники значення межі вогнестійкості вертикальних залізобетонних будівельних конструкцій від дисперсії температур на їх обігрівальних поверхнях. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 58–59.

47. Данкевич І., Канюк В., Неділько І., Сідней А., Лозумирська А., Трошкін С., Сопільник В., Сідней С. Дослідження прогріву залізобетонної плити в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 23–24. 48. Гвоздь В., Тищенко О., Поздєєв С., Шналь Т., Луб'яний А., Сідней С. Оцінка вогнестійкості залізобетонних плит перекриттів за умов стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали XI Всеукраїнської науковопрактичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2021. С. 88–90.

49. 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*. Bristol: IOP Publishing Ltd. 2021. Vol. 1021. № 1. Р. 012023. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

50. Некора В. С., Сідней С. О., Шналь Т. М., Некора О. В. Поведінка сталезалізобетонної плити при пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2022. С. 34–35.

51. Поздєєв С. В., Несен І. С., Сідней С. О. Оцінка вогнестійкості залізобетонного маршу сходової клітини. Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення». Львів: ЛДУ БЖД. 2022. С. 132–134.

52. Поздєєв С. В., Березовський А. І., Неділько І. А., Сідней С. О. Обґрунтування спрощеного розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонної пустотної плити. *Матеріали IX Міжнародної конференції* «Актуальні проблеми інженерної механіки». Одеса: ОДАБА. 2022. С. 155–157.

53. Sidnei S., Shnal T., Kholod P., Pozdieiev S. Forecasting the Behavior of Steel Beams with Corrugated Walls Under the Thermal Exposure of a Fire. In: Blikharskyy, Z. (eds) *Proceedings of EcoComfort 2022.EcoComfort 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham. 2022. Vol 290. P. 388–398. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

54. Банщиков С. О., Сідней С. О., Рудешко І. В. Дослідження розподілу температури по залізобетонній колоні при впливі стандартного температурного режиму пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції* 

молодих учених: «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту». Харків: НУЦЗУ. 2023. С. 12.

55. Сідней С. О., Березовський А. І., Касярум С. О., Частоколенко І. П. Дослідження поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗУ. 2023. С. 147–148.

56. Vranay F., Zelenakova M., Nekora O., **Sidnei S.** Determination of temperature distribution in a ribbed reinforced concrete slab under the thermal influence of fire. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2023. С. 100–102.

57. Pozdieiev S., Sidnei S., Hvozd V., Tyshchenko O., Shnal T. Study of fire resistance of reinforced concrete slabs under thermal influence based on the use of the parametric temperature fire modes. *Proceedings of the 9th International scientific conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structure and Buildings» (TransBud 2021)*. Kharkiv. 2023. Vol. 2684. № 1. P. 030035-1-030035-8. (*Видання включено до наукометричної бази Scopus*).

58. Sidnei S., Berezovskyi A., Nedilko I., Pozdieiev S. The improvement of the simplified calculation method for assessing the fire resistance of a hollow-core slab. *AIP Conf. Proc.* 2023. Vol. 2840. №1. Р. 040004. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

59. Pozdieiev S., Sidnei S., Nekora O., Subota A., Kulitsa, O. Study of the Destruction Mechanism of Reinforced Concrete Hollow Slabs Under Fire Conditions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Kharkiv. 2023. P. 447–457. (Видання включено до наукометричної бази Scopus).

60. Зуєнко М., Брусліновська П., Самойленко М., Сулейманов А., Сідней С. Дослідження залізобетонної ребристої плити під час оцінювання вогнестійкості за втратою несучої здатності. *XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів: ЛДУ БЖД. 2024. С. 161–164. 61. Сідней С. О., Березовський А. І., Рудешко І. В., Іщенко І. І. Дослідження вогнестійкості порожнистої плити при пожежі за допомогою математичного моделювання. *Х Міжнародна конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки»*. Одеса. 2024.

62. Поздєєв С., Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Іщенко І. Дослідження настання граничних станів з вогнестійкості залізобетонної порожнистої плити. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 254–255.

63. Сідней С., Рудешко І., Романенко Д., Зуєнко М. Дослідження закономірності впливу навантаження на вогнестійкість ребристій залізобетонній плиті. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 134–136.

64. Сідней С., Тейзе А., Рудешко І. Дослідження втрати несучої здатності залізобетонної ребристої плити під час впливу пожежі. *Надзвичайні ситуації:* безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. С. 136–138.

65. Сідней С. Вплив скінченно-елементної сітки на розподіл температур у плиті при пожежі. *XXIII Наукова конференція «Наукові підсумки 2024 року».* Збірка наукових тез. Харків: Технологічний центр. 2024. С. 31.

#### ДОДАТОК Б. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ Перший проректор Національного університету шивільного захисту України з навчальної робохи



AKT

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності» автора Сіднея Станіслава Олександровича

Комісія у складі:

голови – начальника навчально-наукового інституту пожежної безпеки, кандидата технічних наук, доцента Мельника В.П.

та членів – доцента кафедри пожежної профілактики у населених пунктах, PhD з цивільної безпеки Рашкевич Н.В.;

 – старшого викладача кафедри пожежної профілактики у населених пунктах Майбороди Р.І.

склали акт, який підтверджує, що результати дисертаційної роботи «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. Запропоновані методики оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій впроваджені в освітній процес на кафедрі пожежної профілактики у населених пунктах Національного університету цивільного захисту України в навчальній дисципліні «Пожежна безпека будівель та споруд» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальність 261 «Пожежна безпека». Впровадження результатів досліджень даної дисертаційної роботи дозволяє підвищити якість проведення лекційних та практичних занять шляхом розширення знань здобувачів за рахунок практичного застосування нових наукових даних.

Голова комісії: начальник навчально-наукового інституту пожежної безпеки, кандидат технічних наук, доцент

Валентин МЕЛЬНИК

Члени комісії: доцент кафедри пожежної профілактики у населених пунктах навчально-наукового інституту пожежної безпеки, PhD з цивільної безпеки

старший викладач кафедри пожежної профілактики у населених пунктах навчально-наукового інституту пожежної безпеки Ніна РАШКЕВИЧ

Роман МАЙБОРОДА

#### ДОДАТОК В. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України Державне підприємство "ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ТА ПРОЕКТНО-ВИШУКУВАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ "НДІПРОЕКТРЕКОНСТРУКЦІЯ" (Інститут "НДІПРОЕКТРЕКОНСТРУКЦІЯ") Одеська філія тел.730-53-69; факс. 730-53-16 Кол €ДРПОУ 03329083 65091, м. Одеса, вул. Середня, 25 Вих. № від ЗАТВЕРДЖУЮ Директор Одеської філії Державного підприємства «Державний науково-дослідний та проектновищукувальний інститут «Нипросктреконструкція» Іван ГЕЛЕБАН more 20 25 01 АКТ про впровадження результатів дисертаційної роботи СІДНЕЯ Станіслава Олександровича на тему: «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності» Складено комісією: Голова комісії: головний науковий співробітник Одеської філії Державного підприємства Державний науково-дослідний та проектно-вишукувальний інститут «НДІпроектреконструкція» доктор технічних наук, доцент МУРАШКО Олексій Володимирович; члени комісії: науковий співробітник Одеської філії Державного підприємства Державний науководослідний та проектно-вишукувальний інститут «НДІпроектреконструкція», кандидат технічних наук ЯКУШЕВ Дмитро Ігорович; науковий співробітник Одеської філії Державного підприємства Державний науководослідний та проектно-вишукувальний інститут «НДІпроектреконструкція», кандидат технічних наук БІЧЕВ Ігор Костянтинович. Комісія перевірила та цим актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи СІДНЕЯ Станіслава Олександровича на тему: «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності» впроваджено у науково-дослідну діяльність шляхом застосування отриманої ієрархічної системи методів оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій. Голова комісії Олексій МУРАШКО доктор технічних наук, доцент Члени комісії Дмитро ЯКУШЕВ кандидат технічних наук Ігор БІЧЕВ кандидат технічних наук

### ДОДАТОК Г. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи СІДНЕЙ Станіслава Олександровича на тему: «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності»

Цей акт складено про те, що результати досліджень, представлених у дисертаційній роботі Сіднея Станіслава Олександровича, було застосовано у роботі філії ДП «Укрдержбудекспертиза» в Одеській області.

Впровадження доцільно використовувати при проведенні експертизи проєктної документації з питань пожежної безпеки на будівництво або реконструкцію, перепланування будівель та споруд. Це дозволяє підвищити пожежну безпеку будівельних об'єктів шляхом підвищення точності встановлення відповідності будівельних конструкцій до вимог щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності.

Провідний експерт будівельний з пожежної і техногенної безпеки

«25» грудня 2024 р.



Андрій ГАЛАК

### **ДОДАТОК Г. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ**

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

#### «НЕЗАЛЕЖНИЙ АУДИТ ТА ІНСПЕКТУВАННЯ СФЕРИ БЕЗПЕКИ» Товариство з обмеженою відповідальністю код за Єдрпоу 43658374

<u>65039, Одеська область, місто Одеса, вул. Артилерійська, буд 4В, офіс-5</u> e-mail:fire.inspection20@gmail.com <u>www.fireinspectionodessa.com.ua</u> тел.+38(094) 955-83-58

Вих. № \_\_\_\_\_ від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ Директор, Товариства з обмеженою відпондатичніства «НЕЗАЛЕЖНИЙ АУДИТ ТА ІНСИЕКТУВАНИЯ СФЕРИ БЕЗПЕКИ» ПОСТИКИ ССЕРИ БЕЗПЕКИ» Олена ВЕЛЄВА «25 % цантича самор 2 / 2024 р. 4066514 АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи СІДНЕЙ Станіслава Олександровича на тему: «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності»

Цей акт складено про те, що результати досліджень, представлених у дисертаційній роботі Сіднея Станіслава Олександровича, було застосовано у роботі Товариства з обмеженою відповідальністю «НЕЗАЛЕЖНИЙ АУДИТ ТА ІНСПЕКТУВАННЯ СФЕРИ БЕЗПЕКИ» на об'єктах будівельної галузі, як в Одеській області, так і на території України.

Впровадження доцільно використовувати при проведенні інспектування систем протипожежного захисту (вогнезахисту залізобетонних будівельних конструкцій), аналізу проектної документації з питань пожежної безпеки на будівництво або реконструкцію, перепланування будівель та споруд, використання у матеріалах при обстеженні будівель і споруд та приймання їх в експлуатацію за участі третьої сторони, що є акредитованою в Національному агентстві з акредитації України. Це дозволить підвищити пожежну безпеку будівельних об'єктів шляхом підвищення точності встановлення відповідності будівельних конструкцій до вимог щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності.

	NEW COLOR OF STREET	
	VADAINA STATE	
	AVIDIT HERTYBAHHA	Дмитро ЯКУШЕВ
/ WEEK	BESHEARN.	7
Edit .	Lasuradinaution Art a fai	
КИ»	A A	Олександр МИТРОФАНСЬКИЙ
POORLANN II TAKCINET POORLANNN POORLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNN POOLLANNNN POOLLANNNNN POOLLANNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNN		ны ГЕЛЕБАН Віктор ФЕДОРОВСЬКИЙ
	КИ СТАТИТИКИ ККИ СТАТИТИКИ ПРОПИТИТИКИ ПОСТИТИТИКИ ПОСТИТИТИКИ ПОСТИТИТИТИКИ ПОСТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИ	KHONE I TAKE TAKE I TAKE TAKE TAKE I TAKE TAKE TAKE I TAKE TAKE TAKE I TAKE TAKE TAKE TAKE I TAKE TAKE TAKE TAKE TAKE I TAKE TAKE TAKE TAKE TAKE TAKE TAKE I TAKE TAKE TAKE TAKE TAKE TAKE TAKE TAKE

#### ДОДАТОК Д. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

тов «комфортмед проект» 65005, м. Одеса, пров. Банний, буд.2, Код ЄДРПОУ — 45339489, тел.+38 (096) 332-01-86 20\_\_\_\_ Вих. № від Ha № від ЗАТВЕРДЖУЮ Директор Товариства з обмеженою відповідальністю «КОМФОРТМЕД ПРОЕКТ» кандидат наук нержавного управління Сергій ЧЕРНОВ/ 0 24 p. «25 » AKT про впровадження результатів дисертаційної роботи СІДНЕЙ Станіслава Олександровича на тему: «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності»

Цей акт складено про те, що результати досліджень, представлених у дисертаційній роботі Сіднея Станіслава Олександровича, було застосовано у роботі Товариства з обмеженою відповідальністю «КОМФОРТМЕД ПРОЕКТ» на об'єктах виробничо-будівельної сфери, як в Одеській області, так і на території України в цілому.

Впровадження доцільно використовувати при проведенні науковотехнічного супроводу (НТС), аналізу проєктної документації з питань пожежної безпеки на будівництво або реконструкцію, перепланування будівель та споруд, використання у матеріалах при обстеженні будівель і споруд. Це дозволить підвищити пожежну безпеку будівельних об'єктів шляхом підвищення точності встановлення. відповідності будівельних конструкцій до вимог щодо їхньої вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності.

Науковий керівник з науково-дослідницької роботи кандидат технічних наук

«25 » грудня

2024p

Ігор ТВАРДОВСЬКИЙ
## ДОДАТОК Е. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

## ЗАТВЕРДЖУЮ Директор

приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Наталія КОНОГРАЙ IIpoer Agheran 2025 року АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності» автора Сіднея Станіслава Олександровича

## Комісія в складі:

голови – головного інженера проекту приватного підприємства «ПроектБудСтар» Романа ПУРДЕНКА та членів – інженера приватного підприємства «ПроектБудСтар» Владислава КОВАЛЬ, інженера приватного підприємства «ПроектБудСтар» Катерини СЕКРЕТ склала даний акт про те, що результати дисертаційної роботи за темою «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності» впроваджені в діяльність приватного підприємства «ПроектБудСтар» шляхом використання ієрархічної системи оцінювання вогнестійкості горизонтальних огороджувальних залізобетонних конструкцій за втратою цілісності при аналізі пожежної безпеки об'єктів будівництва.

Даний акт не є підставою для одержання премій та інших винагород із фондів Національного університету цивільного захисту України.

Голова комісії: головний інженер проекту приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Члени комісії: інженер приватного підприємства «ПроектБудСтар»

інженер приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Романа ПУРДЕНКА

Владислава КОВАЛЬ

--- <del>К</del>атерини СЕКРЕТ