

Державна служба України з надзвичайних ситуацій  
Національний університет цивільного захисту України  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

**ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ВОГНЕВИХ  
ВИПРОБУВАНЬ ПРИ ОЦІНЮВАННІ МЕЖІ  
ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТІН**

***МОНОГРАФІЯ***

Під загальною редакцією  
доктора технічних наук, професора  
**ПОЗДЄЄВА СЕРГІЯ ВАЛЕРІЙОВИЧА**

**Черкаси 2021**

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
НУЦЗ України  
(протокол №13 від «27» серпня 2021 року)*

Достовірність результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін: монографія / за заг. ред. д-ра техн. наук, професора С. В. Поздєєва. – Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. – 100 с.

**Авторський колектив:** С. В. Поздєєв, С. О. Сідней, В. М. Гвоздь, О. М. Тищенко, О. М. Нуянзін, О. В. Некора, Т. М. Шналь, А. І. Березовський, І. В. Рудешко, С. М. Федченко, І. А. Неділько.

**Рецензенти:**

**В. І. Осипенко** – доктор технічних наук, професор;

**В. К. Костенко** – доктор технічних наук, професор.

Описані методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій. За допомогою розроблених моделей одержано залежність значень межі вогнестійкості вертикальних залізобетонних будівельних конструкцій від дисперсії температур на їхніх обігрівальних поверхнях, а також похибки визначення межі вогнестійкості цих конструкцій. Також обґрунтовано конструктивні параметри вогневої печі, які забезпечують мінімально можливі дисперсії температур по обігрівальній поверхні несучої стіни при випробуваннях на вогнестійкість вертикальних залізобетонних конструкцій та алгоритм їх визначення. Показано, що використання уточнених розрахункових методів для визначення межі вогнестійкості несучих стін є ефективним.

Для наукових, науково-педагогічних співробітників, докторантів, аспірантів (ад'юнктів), курсантів та студентів, що володіють відповідним математичним апаратом в межах навчальної програми технічного закладу вищої освіти III-IV рівня акредитації.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ТА НАУКОВИХ РОЗРОБОК ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТІН.....</b>	<b>6</b>
1.1. Особливості проведення вогневих випробувань несучих стін у печах установок для вогневих випробувань за стандартним температурним режимом .....	6
1.2. Особливості математичного моделювання теплових процесів .....	15
1.3. Особливості математичного моделювання напружено- деформованого стану будівельних конструкцій під час їх випробувань на вогнестійкість .....	24
1.4. Прикладне програмне забезпечення моделювання процесу випробування на вогнестійкість несучих стін .....	26
<b>РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ЗАСНОВАНІ НА ВИКОРИСТАННІ ПОВНОЇ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ НАВ'Є – СТОКСА, ДЛЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ІЗ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТІН.....</b>	<b>30</b>
2.1. Особливості комп'ютерних моделей тепломасообміну у вогневих печах під час випробування несучих стін на вогнестійкість .....	30
2.2. Методика проведення обчислювального експерименту з випробування несучих стін на вогнестійкість .....	41
2.3. Результати обчислювальних експериментів із випробувань на вогнестійкість у комп'ютерних моделях вогневих печей.....	46
2.4. Статистичне оброблення результатів вогневих випробувань та обчислювальних експериментів із їх моделювання.....	53
<b>РОЗДІЛ 3. АДЕКВАТНІСТЬ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ .....</b>	<b>55</b>
3.1. Експериментальне випробування на вогнестійкість несучої залізобетонної стіни .....	55
3.2. Геометричні особливості комп'ютерної конфігурації камери вертикальної випробувальної установки .....	64
3.3. Перевірка адекватності математичної моделі вертикальної вогневої печі, побудованої на основі повної системи рівнянь Нав'є – Стокса .....	65

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТОВАННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОГНЕВОЇ ПЕЧІ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ МІНІМАЛЬНО МОЖЛИВІ ДИСПЕРСІЇ ТЕМПЕРАТУР НА ОБІГРІВАЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ СТІНИ ПІД ЧАС ЇЇ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ.....	69
4.1 Теоретичні передумови обчислювального експерименту .....	69
4.2 Визначення конструктивних параметрів вогневої печі, які забезпечують мінімально можливі дисперсії температур на обігрівальній поверхні стіни під час випробувань на вогнестійкість .....	70
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСІЇ ТЕМПЕРАТУР ПО ОБІГРІВАЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ НЕСУЧИХ СТІН НА ЗНАЧЕННЯ ЇХНЬОЇ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ.....	76
5.1. Постановка теплотехнічної задачі щодо визначення несучої здатності залізобетонної стіни в умовах пожежі .....	76
5.2. Результати розв'язку теплотехнічної задачі.....	80
5.3. Постановка задачі міцності щодо визначення несучої здатності залізобетонної стіни в умовах пожежі .....	82
5.4. Результати розв'язку задачі міцності .....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	93

## ВСТУП

Забезпечення пожежної безпеки є невід'ємною складовою державної політики в Україні. В умовах пожежі завжди відбувається порушення загальної стійкості будівлі внаслідок руйнування окремих елементів в каркасі споруди. Зважаючи на це, одним із важливих аспектів забезпечення пожежної безпеки у наш час є застосування будівельних конструкцій, зокрема несучих стін із гарантованою межею вогнестійкості.

Для визначення меж вогнестійкості найбільш поширеним є метод випробувань у спеціальних вогневих випробувальних печах. Проте, вогневі випробування та параметри сучасних випробувальних установок далекі від досконалості, оскільки існують похибки, внаслідок того, що управління паливною системою та конфігурація вогневих печей не забезпечують повну відповідність умов проведення експерименту вимогам стандартів у даній галузі.

Дослідженням процесу випробувань на вогнестійкість залізобетонних конструкцій займалися і займаються багато вчених, зокрема Яковлев О. І., Ройтман В. М., Харченко І. О., Бушев В. П., Мілованов О. Ф., Фомін С. Л., Страхов В. Л., Семерак М. М., Демчина Б. Г., Гивлюд М. М., Ковалишин В. В., Круковський П. Г., Новак С. В., Поздєєв С. В., T. Lie, V. Bartelemi, G. Kruppa, T. Harmathy, проте в їх роботах недостатньо уваги було приділено впливу на значення межі вогнестійкості несучих стін дисперсії температур по їх обігрівальній поверхні, тому розв'язання цієї задачі є актуальним і сприятиме підвищенню ефективності випробувань з оцінювання вогнестійкості цих конструкцій.

Визначення достовірності значень меж вогнестійкості несучих стін будівель полягає у проведенні випробувань у вогневих печах з обґрунтованими параметрами за алгоритмом, який враховує закономірності впливу дисперсії температур по їх обігрівній поверхні.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СТАНУ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ТА НАУКОВИХ РОЗРОБОК ЩОДО ВИПРОБУВАНЬ ІЗ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТІН

#### 1.1. Особливості проведення вогневих випробувань несучих стін у печах установок для вогневих випробувань за стандартним температурним режимом

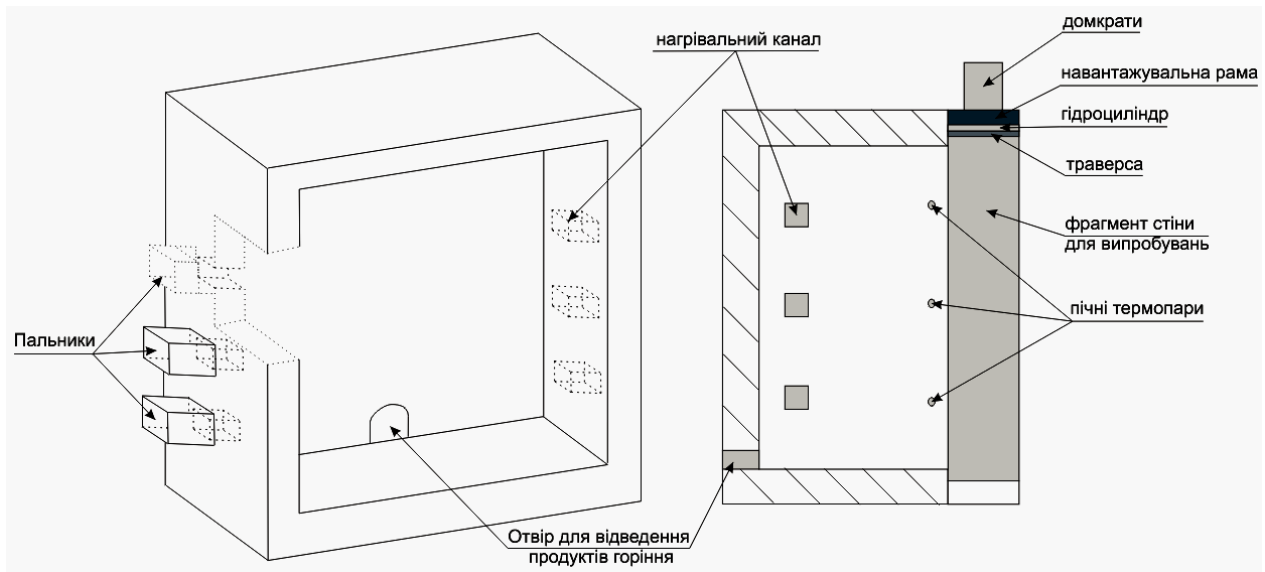


Рис. 1.1 – Схематичне зображення вертикальної вогневої установки для проведення випробувань на вогнестійкість несучих стін

Метод випробувань на вогнестійкість за стандартним температурним режимом застосовують за допомогою випробувальних установок, що поєднують вогневу піч і навантажувальний пристрій, із прямою фіксацією межі вогнестійкості за настанням граничного стану. Вогневі печі мають відповідати особливим вимогам:

- нагрівальний факел створений на рідкому паливі;
- полум'я факела не торкається поверхонь елементів конструкції, що нагріваються;
- рівномірно розподілена температура по об'єму нагрівальної камери;
- протягом випробування в об'ємі нагрівальної камери температура змінюється за температурним режимом пожежі, що регламентовано в стандарті [1].

Випробувальне обладнання має забезпечити отримання повторюваних та відтворюваних результатів; конструкція випробувальної печі – створення нормованого теплового впливу на зразок. Таким впливом є стандартизований

температурний режим і нормований надлишковий тиск у вогневій камері печі. Внутрішня футерівка печей має бути виконана з теплоізоляційного матеріалу з густиною не більше ніж  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Товщина футерівки – не менше від 50 мм. Футерівка печі виконана з матеріалу, теплова інерція якого за температури  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідає такій умові:

$$\sqrt{\lambda \rho c} = 500 \text{ Вт с}^{1/2} \text{ м}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт} \times \text{м}^{-1} \times \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\rho$  – густина,  $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$ ;  $c$  – питома теплоємність,  $\text{Дж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Нагрівання зразка у вогневій камері печі має відбуватися за допомогою пальників, які повинні бути розташовані так, щоб полум'я не торкалося поверхні зразка. У пальниках слід використовувати рідке паливо, яке подають автоматично. Більш чіткі вимоги до паливно-форсункової системи в нормативному документі [1] відсутні, не регламентована, зокрема, висота печей, розташування пальників та отворів для видалення продуктів горіння з камери печі.

Розміри печі мають уможливлювати випробування зразків, розміри яких регламентовані стандартами [1–2; 5; 7–11]. Так, піч для випробування вертикальних огорожувальних конструкцій повинна мати проріз у передній стінці печі розмірами не менше ніж  $3000 \text{ мм} \times 3000 \text{ мм}$  і глибину простору вогневої камери не менше від 0,8 м. Для прикладу на рис. 1.2 зображено вертикальні вогневі випробувальні установки для проведення випробувань на вогнестійкість несучих стін, що використовуються у різних країнах світу.



Рис. 1.2 – Вертикальні вогневі випробувальні установки для проведення випробувань на вогнестійкість несучих стін

Відповідно до стандартів [5], температурний режим забезпечують шляхом спалювання рідкого палива, система подання пального має бути автоматичною. У працях дослідників [13; 14] зазначено, що для ефективного дифузного спалювання рідке паливо повинно пройти попередню стадію випаровування без пірогенетичного розкладу. Для цього рідке паливо перед поданням у камеру печі дроблять у форсунках на мілкі краплі паром чи стиснутим повітрям або розпиляють під тиском насосів за умов подання через спеціальні насадки.

У конструкції печі, згідно з вимогами [1], передбачено засоби вимірювальної техніки, що необхідні під час випробувань за стандартним температурним режимом, до них належать:

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

Таблиця 1.1

**Засоби вимірювальної техніки, необхідні  
під час випробувань за стандартним температурним режимом**

Засоби вимірювальної техніки	Вимоги відповідно до [1]	Необхідна точність	Примітка
У процесі вимірювання температури в печі	Необхідно використовувати термопари з діаметром дроту не більше ніж 1,5 мм типу ТХА або термопари інших типів за [15], що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300 °С.	±15 °С	Термопари типу ТХА мають найбільш близькі до прямої характеристики. Призначені для роботи в окисних та інертних середовищах [15].
Під час вимірювання температури всередині зразка	Необхідно використовувати термопари з діаметром дроту не більше ніж 0,75 мм типу ТХА або термопари інших типів за [15], що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 600 °С.	±10 °С	Термопари типу ТХА мають найбільш близькі до прямої характеристики. Призначені для роботи в окисних та інертних середовищах [15].



## Продовження таблиці 1.1

Засоби вимірювальної техніки	Вимоги відповідно до [1]	Необхідна точність	Примітка
У ході вимірювання температури необігрівальної поверхні зразка	Потрібно використовувати термопари з дроту діаметром від 0,5 до 0,75 мм типу ТХК або інші за [15], що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 300 °С.	$\pm 4$ °С	Термопари типу ТХК мають найбільшу чутливість, високу термоелектричну стабільність за умов температури до 600 °С. Призначені для роботи в окисних та інертних середовищах. Недолік – висока чутливість до деформацій [15].
Вимірюючи температуру навколишнього середовища	Необхідно вимірювати термопарою, конструкція якої аналогічна до конструкції термопар, призначених для вимірювання температури в печі.	$\pm 4$ °С	Допускають використання інших засобів для вимірювання температури навколишнього середовища, якщо вони забезпечують точність вимірювання [1].
Надлишковий тиск у печі	Необхідно вимірювати приладами, що вможливають вимірювання з точністю.	$\pm 2$ Па	
Вимірювання навантаження	Може бути виконане за допомогою динамометру або інших приладів, які забезпечують вимірювання з точністю.	$\pm 5$ %	
Вимірювання деформацій	Може бути виконане механічними, оптичними або електричними приладами, які мають забезпечувати вимірювання деформацій із необхідною точністю.	$\pm 2$ мм	

Відомості, представлені в табл. 1.1, засвідчують, що для контролю температури у вогневій камері печі можна застосовувати термопари з неізолюваними проводами або термопари, покриті захисним кожухом. Захисний кожух термопари має бути видалений (відрізаний і знятий) на довжині не менше ніж 25 мм від вимірювального спаю термопари. На рис. 1.3. подано схематичне зображення термопари із захисним кожухом, що призначена для вимірювання температури в печі. Вимірювальний спай термопари повинен бути зварним [2].

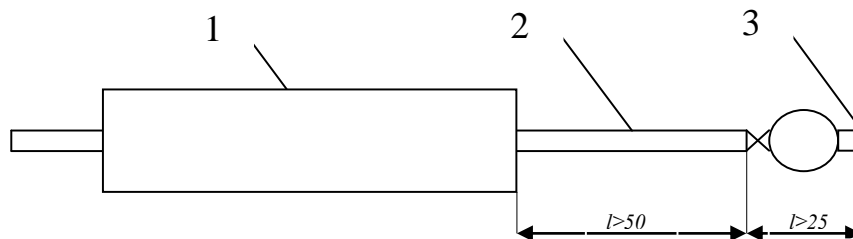


Рис. 1.3 – Термопара для вимірювання температури в камері вогневої печі: 1 – теплозахисна оболонка; 2 – захисний кожух; 3 – вимірювальний спай

Температуру в печі необхідно вимірювати термопарами не менше ніж у п'яти місцях. При цьому на кожні 1,5 м отвору печі, що призначена для випробування огорожувальних конструкцій, та на кожні 0,5 м довжини або висоти печі, яка слугує для випробування стержневих конструкцій, має бути встановлена одна термопара. Вимірювальний спай термопар необхідно встановлювати на відстані від 90 до 110 мм від поверхні зразка. Відстань від вимірювального спаю термопар до стінок печі – не менше ніж 200 мм.

Для вимірювання температури на необігрівальній поверхні вимірювальний спай термопари має бути припаяний у центрі зовнішньої поверхні мідного диска діаметром 12 мм і завтовшки 0,2 мм, що прикріплюють до необігрівальної поверхні зразка в необхідному місці за допомогою шпильок, болтів та інших пристроїв і матеріалів, які вможливають надійне кріплення диска. Мідний диск накривають зверху квадратною накладкою розміром 30 мм x 30 мм із базальтового картону завтовшки 2 мм, що притиснутий до необігрівальної поверхні зразка металевою скобою або іншими можливими способами [1].

Можливо вимірювати температуру на необігрівальній поверхні зразка термопарами, що закріплені іншими способами, які засновані на принципі заглиблення вимірювального спаю термопари на половину його товщини до поверхневого шару матеріалу. При цьому заглибленню підлягають також і дроти термопар на ділянці завдовжки не менше ніж 30 мм від вимірювального спаю термопари в напрямку, що паралельний до ізотерми.

Температуру на необігрівальній поверхні зразка необхідно вимірювати не менше ніж п'ятьма термопарами, одна з яких прикріплена в геометричному центрі необігрівальної поверхні, а інші – у геометричних

центрах окремих її чвертей. Вимірювальні спаї термопар закріплюють на відстані більше ніж 50 мм від теплових містків, що утворюються кріпильними елементами (болтами, гвинтами, шурупами тощо), а також від місць, де можна прогнозувати витікання газів із печі [1].

Згідно з показниками цих термопар, визначають середню температуру на необігрівальній поверхні зразка. Якщо в зразку можна виділити ділянки з різним тепловим опором, які мають площу поверхні не менше ніж  $0,2 \text{ м}^2$ , то необхідно визначати середню температуру поверхні для кожної з ділянок. Для цього в кожній із ділянок необхідно встановити не менше від трьох термопар. Середню температуру на необігрівальній поверхні зразка визначають як середнє арифметичне значень середніх температур окремих ділянок необігрівальної поверхні зразка.

У ході вимірювання температури всередині зразка термопари не повинні підлягати безпосередньому впливу полум'я. Дроти термопар мають бути розташовані вздовж ізотерми на відстані не менше ніж 50 мм від вимірювального спаю термопар.

Крім того, необхідно встановлювати термопари в таких місцях необігрівальної поверхні зразка, де під час випробувань очікують на найвищу температуру (наприклад, у зоні ребер, стиків тощо). Для вимірювання температури в цих місцях необігрівальної поверхні зразка можливе використання переносної термопари, конструкцію якої зображено на рис. 1.4.

Усі засоби вимірювальної техніки та термопари повинні мати чинні свідоцтва про повірку, що підтверджують точність вимірювання певного параметра. У документі [16] сформульовано вимоги до інструментальної похибки систем для вимірювання температури в печі, на (в) зразку, до приладів для вимірювання надлишкового тиску в печі, величини навантаження на зразок, деформацій зразка (для визначення часу настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності). Для визначення часу настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності, у стандарті окреслено вимоги до розмірів та конструкції спеціальних пристроїв із метою оцінювання цілісності зразка (пристрою на основі ватного тампона та металевих щупів номінальним діаметром 6 мм і 25 мм).

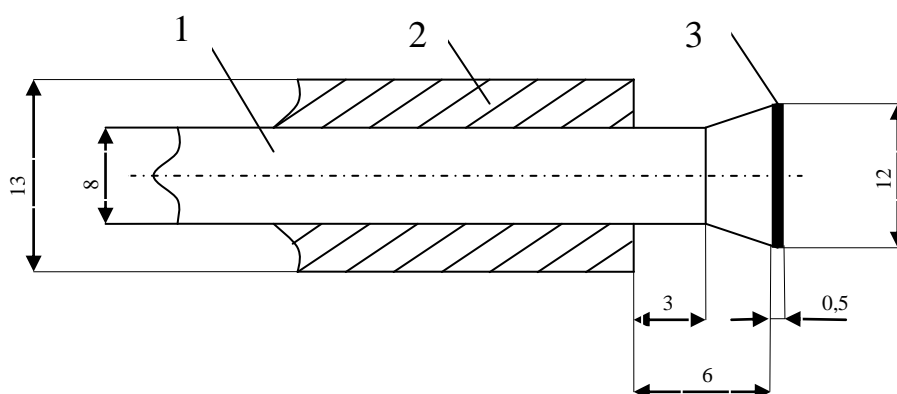


Рис. 1.4 – Переносна термопара: 1 – захисний кожух; 2 – теплозахисна оболонка; 3 – мідний диск

Можливість створення в кожній конкретній випробувальній печі нормованого впливу на зразок має бути підтверджена під час атестації печі відповідно до вимог [1]. У процесі атестації проводять випробування спеціальних зразків для атестації за стандартним температурним режимом. У ході цих випробувань визначають нормовані характеристики: температуру та надлишковий тиск у вогневому просторі печі протягом не менше ніж 90 хв. Значення температури в кожну хвилину випробування не повинне перевищувати гранично допустимих значень, регламентованих у нормативному документі [1] для максимальних і мінімальних відхилень за стандартного температурного режиму, а значення надлишкового тиску в печі – чинних допустимих відхилень ( $\pm 3$  Па) від номінального значення.

Печі обладнують сучасними комп'ютерними вимірювально-реєструвальними комплексами зі спеціальним програмним забезпеченням для збору та оброблення інформації щодо значень температури в печі та на зразках, вимірювання деформацій тощо. Такі печі дають змогу проводити випробування основних будівельних конструкцій і виробів, до яких сформульовано вимоги з вогнестійкості в нормативних документах [1; 5].

Обладнання для встановлення зразка в печі має містити обладнання для спирання зразка та обладнання для навантажування зразка.

Обладнання для спирання зразка має відтворювати реальні умови роботи конструкції, це можуть бути спеціально сконструйовані пристрої. Наприклад, для випробування перекриттів у конструкції печі потрібно передбачити засоби, які вможливають закріплення зразка відповідно до проектної документації (наприклад, жорсткі рами), а також засоби для забезпечення вільного спирання зразка на стінках печі.

Зразок має бути встановлений у печі залежно від напрямку можливого впливу пожежі на конструкцію, межу вогнестійкості якої треба визначити. Тому в конструкції печі, призначеної, наприклад, для випробування вертикальних огорожувальних конструкцій, слід передбачити нагрів зразка з одного боку. Для випробування горизонтальних конструкцій (перекриттів, покриттів тощо) у печах має бути нагрів знизу. Колони, балки, інші стрижневі конструкції випробовують у печах, які забезпечують нагрів із трьох або з чотирьох боків.

У конструкції печі також мають бути створені умови для навантажування зразків несучих конструкцій (несучих стін, колон тощо). Обладнання для навантажування зразка вможливує навантажування та підтримування навантаження в межах  $\pm 5\%$  від необхідної величини без зміни його розподілу за зразком протягом усього часу випробування до моменту втрати зразком несучої здатності. Обладнання для навантажування залізобетонних зразків вертикальних конструкцій повинно відповідати вимогам [16], при цьому не перешкоджати використанню ізолювальних прокладок термопар, вимірюванню деформацій та температури поверхні зразка з боку, протилежного вогневому впливу, а також спостереженню за поверхнею зразка.

Отже, технічний опис установок для випробувань несучих стін, які входять до національних стандартів держав, підпорядкований загальним принципам роботи, що відображено в таких положеннях [1; 5]:

1) ініціація й підтримання горіння відбуваються за допомогою рідкопаливних форсунок, що працюють на гасі;

2) розташування та робота форсунок повинні забезпечувати рівномірний нагрів по всій поверхні випробовуваного елемента конструкції, а також не допускати безпосереднього зіткнення факела з його поверхнями;

3) контроль температури в печі, управління роботою форсунок, а також контроль нагріву поверхні та внутрішніх шарів випробовуваного елемента проводять за допомогою термопар, конструкція яких стандартизована;

4) стандартного температурного режиму пожежі досягають шляхом попереминого ввімкнення й вимкнення форсунок, контролюючи термопару.

За результат випробувань, згідно зі стандартним температурним режимом, обирають межу вогнестійкості конструкції, що визначена за формулою:

$$t_{fr} = t_{mes} - \Delta t, \quad (1.2)$$

де  $t_{fr}$  – межа вогнестійкості конструкції, хв.;  $t_{mes}$  – найменше значення часу від початку випробування до досягнення граничного стану з вогнестійкості, що визначене за результатами випробувань однакових зразків, хв.;  $\Delta t$  – похибка випробування, хв.

Значення похибки методів випробувань, вогнестійкості конструкцій конкретних типів описано в стандартах [1; 4–5; 16–17]. Якщо значення похибки в стандарті не подане, то його визначають за формулою:

$$\Delta t = 0,015t_{mes} + 3. \quad (1.3)$$

Результати випробувань за стандартним температурним режимом пожежі не можуть бути екстрапольовані на конструкції, у яких були використані як заміна інші матеріали, а також на конструкції, до яких унесено конструктивні зміни або змінена технологія їх виготовлення.

Випробування на вогнестійкість за стандартним температурним режимом більш прийнятні, оскільки вони дають змогу максимальним чином урахувати всі особливості досліджуваного елемента, геометрія і властивості якого в точності збігаються з геометрією та властивостями випробовуваного зразка [1; 5; 18–20]. До його основних переваг належить найбільша відповідність умов, відтворених у ході експерименту, умовам, що виникають під час пожежі. Водночас варто зауважити, що, попри очевидні переваги, випробування на вогнестійкість за стандартним температурним режимом мають певні недоліки.

До недоліків підходу зараховують насамперед його велику трудомісткість і високу вартість [21–22]. В окремих випадках проведення вогневих випробувань неможливе через те, що конструкції є дуже складними та громіздкими. До того ж проведення випробувань вимагає спеціальних умов, великих площ і пов'язане із забрудненням довкілля.

Згідно з дослідженнями [12; 21–22], аналізований метод має суттєвий недолік, який зумовлений появою похибки в результатах впливу таких чинників:

- взаємне розташування зразків і вимірювальних засобів;
- теплообмін на поверхнях вимірювальних засобів та зразків;
- фізико-хімічні процеси, що відбуваються в потоках пічних газів у просторі камери випробувальної печі;
- керування паливною системою не може забезпечити повну відповідність режиму нагріву камери печі стандартному температурному режимові пожежі.

Необхідно зазначити, що, згідно з документом [1], під час випробування зразків конструкцій, виконаних із негорючих матеріалів, на окремих термopарах після 10 хвилин випробування допускають відхилення температури від стандартного температурного режиму до 203 °С, що своєю чергою впливає на адекватність результатів випробувань.

### **Джерела похибок у процесі проведення вогневих випробувань**

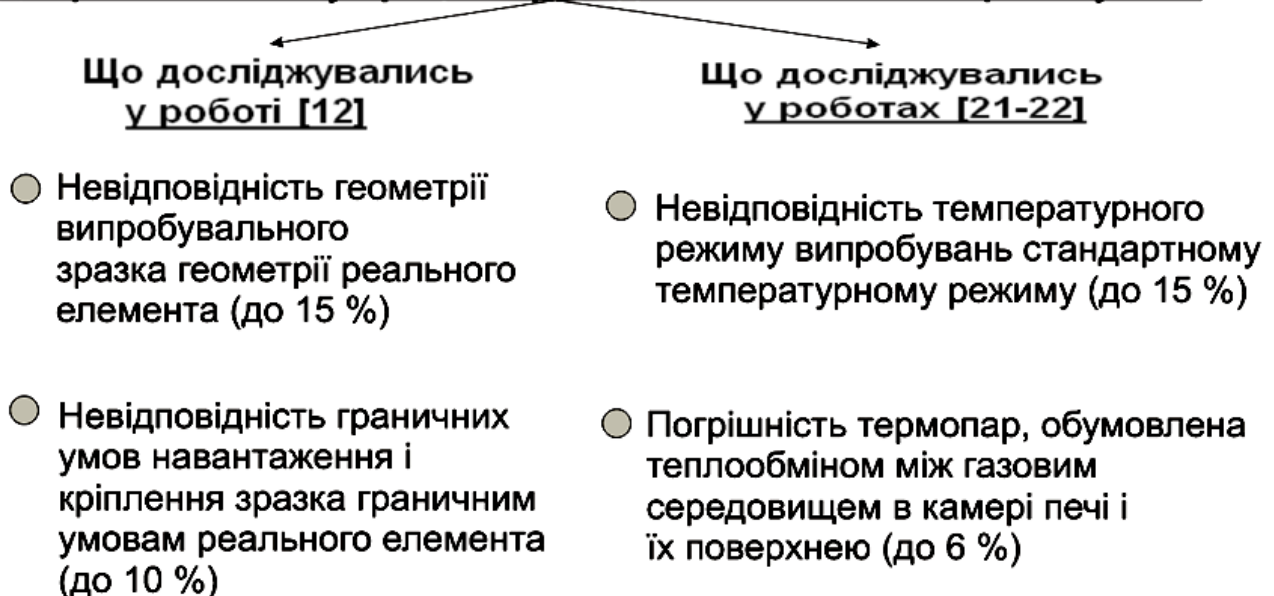


Рис. 1.5 – Схематичне зображення джерел похибок при випробуваннях на вогнестійкість будівельних конструкцій, що досліджувались у роботах науковців

У зв'язку з тим, що управління паливною системою не може забезпечити повну відповідність режиму нагріву камери печі стандартному

температурному режимові пожежі, існує певна похибка в реалізації режиму нагріву елемента [23].

Стандартні методи вогневих випробувань достатньо вивчені, що засвідчує низка робіт [6; 12; 21–32], де з'ясовано основні аспекти випробувань на вогнестійкість залізобетонних конструкцій. Однак у працях бракує аналізу метрологічних характеристик випробувальних установок і впливу конструктивних особливостей цих установок на результати випробувань.

Випробування на вогнестійкість у спеціальних установках не можна вважати абсолютно достовірним й універсальним методом для визначення фактичної межі вогнестійкості елементів залізобетонних будівельних конструкцій, тому їх потрібно коригувати відповідно до додаткових досліджень, які проводять за допомогою обчислювальних експериментів із використанням математичного моделювання. Перевага саме цього методу перед іншими полягає в заощадливості, екологічності та ефективності. Умовно ці методи поділяють на спрощені й ті, у яких використовують повну систему рівнянь Нав'є – Стокса [6].

## **1.2. Особливості математичного моделювання теплових процесів**

Для математичного обчислення процесу тепломасообміну у вогневих печах нині використовують інтегральні, зонні та польові моделі [3–7]. Інтегральні моделі дають змогу отримати прогноз середніх значень параметрів стану середовища в камері печі для будь-якого моменту випробувань. У зонних моделях весь простір камери печі поділяють на характерні просторові зони й визначають середні значення параметрів стану середовища в цих зонах для будь-якого моменту часу. Польові або диференціальні моделі тепломасообміну вможливають прогноз просторово-часового розподілу температур і швидкостей газового середовища в камері печі, концентрацій компонентів середовища, тиску та густин у будь-якій точці [5].

Польові моделі, позначені в зарубіжній літературі аббревіатурою CFD (computational fluid dynamics – англ. обчислювальна гідродинаміка), є більш потужним та універсальним інструментом, ніж зональні та інтегральні, оскільки ґрунтовані на зовсім іншому принципі. Замість однієї або кількох великих зон у польових моделях виокремлюють численну кількість (зазвичай тисячі або десятки тисяч) маленьких контрольних обсягів, не пов'язаних із передбачуваною структурою потоку [7]. Для кожного з цих об'ємів за допомогою низки методів розв'язують систему рівнянь у часткових похідних, що виражають принципи локального збереження маси, імпульсу, енергії та інших компонентів. Отже, динаміка розвитку процесів залежить не від апріорних припущень, а лише від результатів розрахунку польових моделей, у яких застосовують повну систему рівнянь Нав'є – Стокса [3-7].

Згідно з аналізованим підходом, використовують фундаментальні рівняння:

рівняння руху потоку (рівняння Нав'є – Стокса);

рівняння нерозривності потоку, що виражене законом збереження матерії;

рівняння розподілу тепла (рівняння Фур'є – Кіргофа);

рівняння стану газу;

рівняння дифузії, що виражає зміну концентрації реагуючого кисню або іншої газової компоненти за умов руху газового потоку.

До цього списку, як правило, додають:

рівняння, що виражає закономірність променистого теплообміну в камері печі;

рівняння швидкості перебігу хімічної реакції;

стехіометричні рівності реакцій;

рівняння руху окремих частинок твердого й рідкого палива з урахуванням гальмівного опору несучого середовища;

рівність надходження й витрат тепла (енергії) у камері печі.

У звичайному вигляді система рівнянь Нав'є – Стокса складається з двох рівнянь:

- рівняння руху,
- рівняння нерозривності.

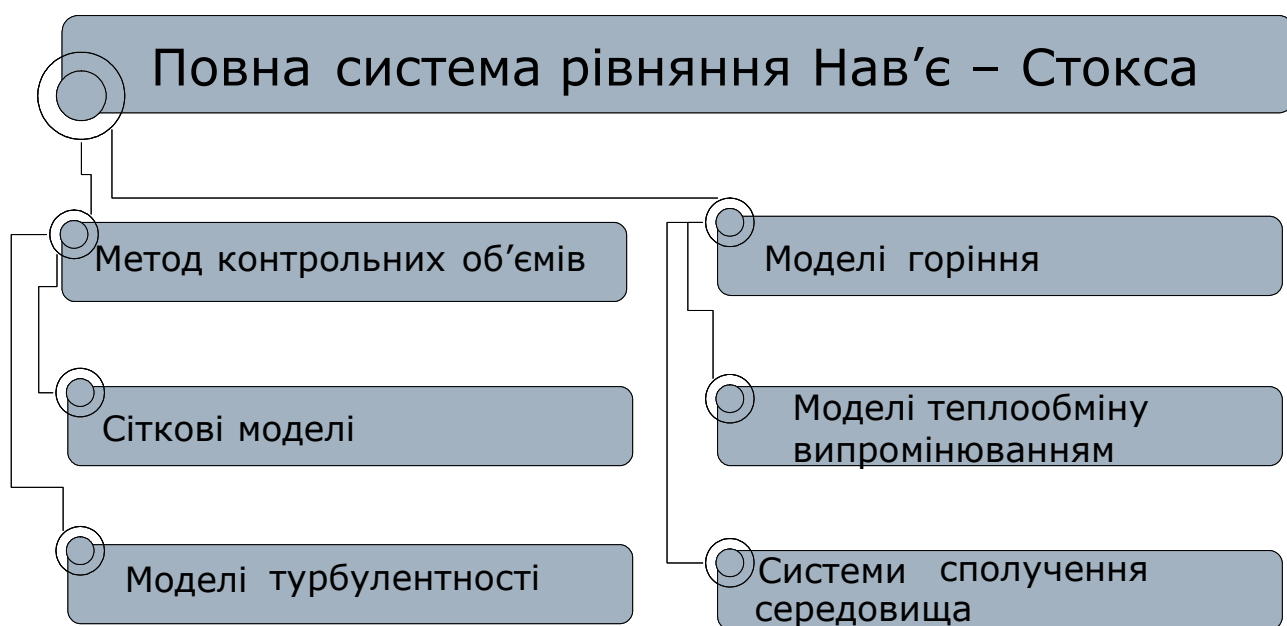


Рисунок 1.6 – Теоретична база для розв'язку задач теплообміну у вогневих печах

Для визначення турбулентної в'язкості застосовують різні варіанти, пов'язані зі способами визначення опосередкованих і флуктуаційних складників величин, що входять до рівняння Нав'є – Стокса. Ці способи визначення турбулентної динамічної в'язкості називають моделями



турбулентності. Найбільше поширення має стандартна  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності [6]. Згідно з цією моделлю, динамічну турбулентну в'язкість визначають за виразом:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1.4)$$

де  $C_\mu = 0,09$  – сталий коефіцієнт;  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної енергії;  $k$  – турбулентна енергія.

Для визначення величин  $\varepsilon$  і  $k$  використовують рівняння, які доповнюють систему рівнянь Нав'є – Стокса, що мають вигляд:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \varepsilon) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (1.6)$$

де  $G$  – величина, яку визначають за виразом:

$$G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, \quad (1.7)$$

де величину  $D_{ij}$  визначають як

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left( \nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}. \quad (1.8)$$

Величину  $\delta_{ij}$ , яка входить до рівняння (5), визначають як:

$$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}. \quad (1.9)$$

Інші параметри, що входять до рівняння (1.5) і (1.6), є постійними.

Для моделювання реагуючого двофазного потоку рідких часток у рухомому повітрі може бути використана модель «5 газів», згідно з номенклатурою [8]. При цьому модель випару часток реалізують у режимі кипіння відповідно до моделі, представленій формулами:

$$\dot{m} = Nu \frac{\lambda_g}{d} \frac{1}{C_{p_p}} \ln \left( 1 + \frac{C_{p_{vol}}(T_g - T_{p,boil})}{h_{lat}(T_{p,boil})} \right), \quad (1.10)$$

де число Нуссельта визначають за формулою:

$$Nu = 2 + 0.556 Re^{1/2} Pr^{1/3} \left( 1 + \frac{1.237}{Re Pr^{4/3}} \right)^{-0.5}, \quad (1.11)$$

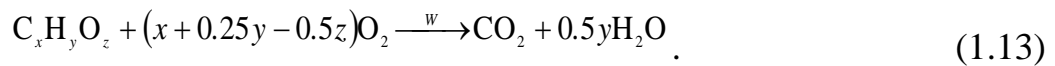
де  $C_{pp}$  – теплоємність часток;  $C_{pvol}$  – теплоємність летючих;  $\lambda_g$  – коефіцієнт теплопровідності газової фази;  $T_g$  – температура газової фази;  $T_{p,boil}$  – температура кипіння рідкої фази частки;  $h_{lat}$  – прихована теплота утворення газової фази в процесі випаровування.

Рідке паливо (гас) представляє узагальнена хімічна вуглеводнева формула  $C_xH_yO_z$  ( $C_6H_6O$ ). Теплоту згорання рідкого палива визначають за такою формулою:

$$LHV_{liq, fuel} = h_{liq, fuel}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x + y + 16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x + y + 16z}, \quad (1.12)$$

де  $h_{O_2}$ ,  $h_{fuel}$ ,  $h_{CO_2}^0$ ,  $h_{H_2O}^0$  – теплоти утворення гасу, вуглекислого газу й води;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – стехіометричні коефіцієнти для гасу, що дорівнюють відповідно 6, 6 і 0.

Модель горіння визначають за швидкістю світла й витратами палива, окисника і продуктів згорання. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням [4]:



Швидкість реакції  $W$  визначають за стехіометричним коефіцієнтом:

$$i_{chem} = \frac{32(x + 0.25y - 0.5z)}{12x + y + 16z}. \quad (1.14)$$

Модель горіння Магнуссена може бути використана як модель горіння, згідно з рекомендаціями для заздалегідь незмішаного палива й окисника.

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

$$W_{mix} = 23.6 \left( \frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{0.25} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( Y_{C_xH_yO_z}, \frac{Y_{O_2}}{i_{chem}} \right). \quad (1.15)$$

Рівняння, що описують моделі теплообміну у вогневій печі для випробувань. Для обліку радіаційного теплообміну в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання газу (P1) [5; 6]. Ця модель побудована на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплопереносу описаний рівнянням:

$$\nabla \left( \frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0, \quad (1.16)$$

де  $E_r$  – густина енергії випромінювання;  $E_b$  – рівноважна густина енергії випромінювання, що визначають за рівнянням:

$$\alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p}, \quad (1.17)$$

$\alpha$  – інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_p, \quad (1.18)$$

$\beta$  – інтегральний за спектром коефіцієнт розсіювання:

$$\beta = \beta_m + \beta_p. \quad (1.19)$$

У рівняннях (14) – (16) використовувані величини мають такі позначення:

–  $\alpha_m, \alpha_p$  – коефіцієнти поглинання відповідно до газового середовища й часток;

–  $\beta_m, \beta_p$  – коефіцієнти розсіювання відповідно до газового середовища й часток;

–  $E_{b,m}, E_{b,p}$  – рівноважна щільність енергії випромінювання для газової фази та фази часток розсіювання відповідно до газового середовища й часток.

Перераховані величини визначають за формулами:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4, \quad (1.20)$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4, \quad (1.21)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (1.22)$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p) \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (1.23)$$

де  $\sigma$  – стала Стефана – Больцмана;  $T_{pj}$  – температура  $j$  – тої частки;  $N_j$  – кількість часток у комірці;  $\varepsilon_p$  – ступінь чорноти часток.

Для опису радіаційного теплообміну між поверхнями обгороджування печі, поверхнями колони й термопари доцільно застосовувати модель «ППП випромінювання», згідно з номенклатурою [8]. Ця модель базована на використанні рівняння радіаційного теплообміну між поверхнями, що має такий вигляд:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - F_{ij}) \sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left( \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - F_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j, \quad (1.24)$$

де  $\delta_{ij}$  – параметр, який дорівнює 0, якщо  $i \neq j$ , та дорівнює 1, якщо  $i = j$ ;  $q_j$  – поверхневий тепловий потік через  $i$ -ту поверхню, яка обмінюється випромінюванням із  $j$ -тою поверхнею;  $F_{ij}$  – променеві форм-фактори, залежні від взаємного розташування  $i$ -тої і  $j$ -тої площ поверхонь, що обмінюються випромінюванням, які визначають за формулою:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i, \quad (1.25)$$

де:  $\theta$  – кут між нормаллю до елемента й лінією, що сполучає елементи  $i$  та  $j$ ;  $r$  – відстань між центрами елементів  $i$  та  $j$ .

Отже, наявні математичні моделі та їх чисельна реалізація дають змогу точно й ефективно змоделювати процес вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість.

Унаслідок проведення низки послідовних ітерацій, отримаємо значення аналізованих функцій у певний момент часу.

Аналогічним чином розраховують значення для кожного моменту часу.

Для складних конструкцій обсяг обчислень є дуже великим, тому більш зручно перекласти монотонні ітерації в алгоритм для персонального комп'ютера [6-8]. Існує багато спеціалізованих програм для побудови геометричних моделей конструкцій, розподілу конструкцій на більш дрібні елементи та розрахунку поведінки елемента й конструкції в цілому.

Вибір конкретного програмного комплексу залежить від особливостей модельованих процесів, можливостей обчислювальної техніки та користувача. Сутність чисельного експерименту полягає в ініціації процесу горіння з контролем температури в середині моделі термопар так, щоб температурний режим їхнього нагріву якомога точно збігався з температурною стандартною кривою пожежі [8].

На основі математичного моделювання необхідно отримати вплив теплообміну між термопарою й камерою печі, урахувати, який вплив на результати має неоднорідний розподіл температур у камері печі та на поверхні дослідного елемента. Математичне моделювання дає змогу виокремити технологічні параметри печі, підвищивши точність випробувань.

Метою моделювання теплового впливу на залізобетонні будівельні конструкції є визначення розподілу температур у внутрішніх шарах елементів у будь-який момент часу розвитку чи згасання пожежі. Цього можна досягнути, вважаючи бетон однорідним, неперервним середовищем. При цьому використовується рівняння теплопровідності Фур'є (1.4). При введенні певних припущень [40–46].

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad}(T)) , \quad (1.26)$$

де  $C_v$  – об’ємна теплоємність, що залежить від температури  $T$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\lambda(T)$  – коефіцієнт теплопровідності, що залежить від температури  $T$ , Вт/(м·К).

Задачі теплопровідності для залізобетонних конструкцій в умовах пожежі мають певні характерні особливості. Для їх розв’язку необхідний розгляд теплових процесів, що відбуваються у приміщенні при пожежі, умов теплообміну на поверхні конструкцій та теплофізичних параметрів у внутрішніх шарах конструкцій. Всі перелічені чинники мають складний характер і приводять до того, що аналітичний розв’язок існує тільки для задач у спрощеній постановці, що негативно відбивається на точності отриманих результатів.

Нормативні розрахункові методики [8,9] рекомендують для визначення вогнестійкості залізобетонних колон використовувати стандартну температурну криву пожежі [7, 47-52].

Динаміка розвитку та згасання пожежі вказує на не стаціонарність нагріву конструкцій під час пожежі, і тому для розв’язку рівняння Фур’є використовуються граничні умови III роду [49, 53]:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w = \alpha(T)(T_{ext} - T) , \quad (1.27)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, що називають коефіцієнтом теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $T_{ext}$  – температура камери печі, °С.

Теплообмін на границі розділу середовищ моделюється за допомогою коефіцієнта теплообміну, який враховує дію конвекції та інфрачервоного випромінювання. Таким чином, коефіцієнт теплообміну дорівнює [49]:

$$\alpha = \alpha_b + \alpha_k , \quad (1.28)$$

де  $\alpha_b$  – коефіцієнт теплообміну від випромінювання;  $\alpha_k$  – коефіцієнт теплообміну конвекцією.

Коефіцієнт  $\alpha_b$  знаходять за формулою:

$$\alpha_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_w^4 - T_p^4}{T_w - T_p} . \quad (1.29)$$

Коефіцієнт теплообміну конвекцією визначають за [36].

Рішення теплотехнічної задачі може бути отримане при застосуванні кінцево-різницевого методу, зокрема, методу «елементарних балансів» Ванічева А. П. [54], а також інших методів [41, 55-64].

За Європейською методикою ТФХ визначається згідно з [8] (рис. рис 1.7.- 1.9.).

У роботах В. М. Ройтмана та Т. Н. Зиріної [41, 65-68] був розвинутий інший математичний апарат для розв'язку теплотехнічної задачі.

Подальшому розвитку математичного апарату для моделювання температурного впливу на пористі матеріали із вологою у порах, до яких належить бетон, присвячений комплекс робіт [46, 67–69] В. Л. Страхова та ін.

Недоліком двох даних методів є необхідність у додатковому складному лабораторному обладнанні для визначення деяких параметрів, що входять у рівняння. Уникнути таких недоліків дозволяють методики, засновані на розв'язку оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ) [46, 70–72].

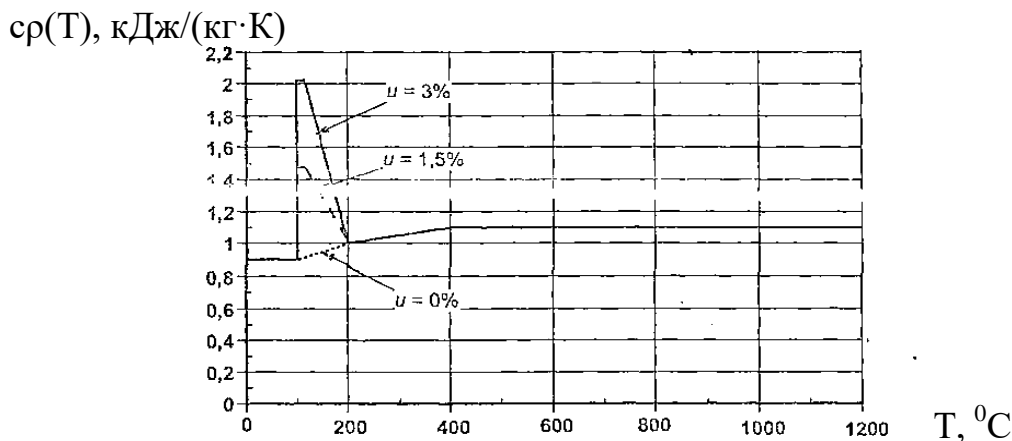


Рис. 1.7 – Залежність питомої теплоємності  $c_r(T)$  від температури для бетону із вмістом масової вологості  $u$  0, 1,5 та 3 %

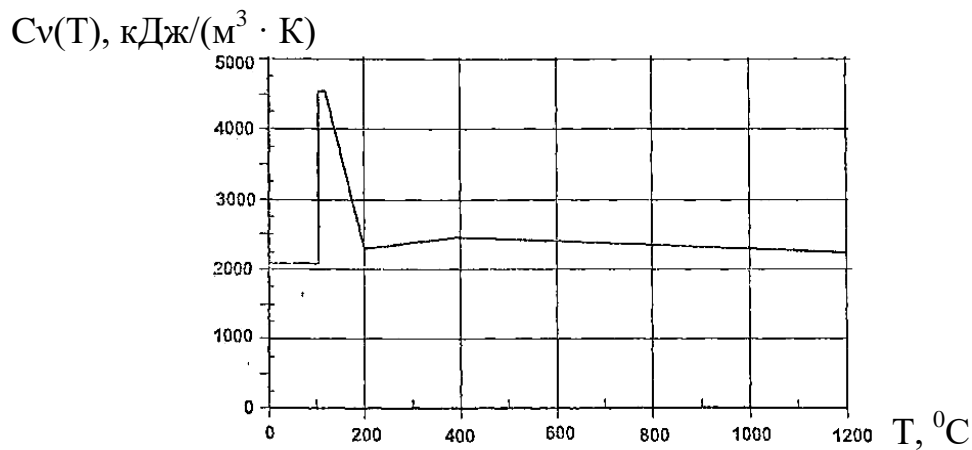


Рис. 1.8 – Залежність об'ємної теплоємності  $C_v(T)$  від температури для бетону густиною більше  $2300 \text{ kg}/\text{m}^3$  із вмістом масової вологості  $u=3\%$

$\lambda_c, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

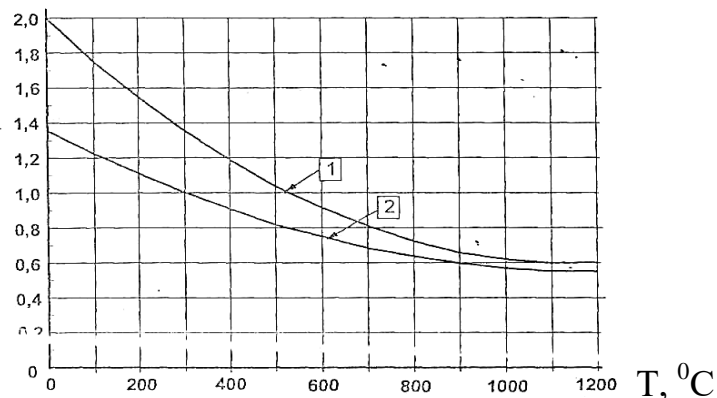


Рис. 1.9 – Теплопровідність бетону ( 1 – верхня межа, 2 – нижня межа)

За допомогою ОЗТ визначаються ефективні коефіцієнт теплопровідності та теплоємність, апроксимовані певними функціональними залежностями від температури, наприклад, у вигляді кубічних поліноміальних функцій (сплайнів). ОЗТ розв’язується за допомогою багатократного рішення прямої задачі з підбиранням таких коефіцієнтів у сплайнах теплофізичних параметрів, при яких має мінімум цільовий функціонал середньоквадратичної нев’язки. Цільовий функціонал має такий вигляд [70]:

$$\Phi = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [T_{iM} - T_{iE}]^2 = \delta^2, \quad (1.30)$$

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

Таким чином, можна зробити такі висновки, що задача із визначення розподілу температур у залізобетонних колонах при пожежі достатньо вивчена і розв’язується за допомогою рівняння теплопровідності Фур’є з урахуванням нестационарності нагріву та нелінійності теплофізичних параметрів. При розв’язанні прямої задачі нестационарної теплопровідності для розрахунку температурних полів у залізобетонних колонах у нелінійній постановці перевага віддається чисельним методам. При розв’язку задачі теплопровідності треба враховувати феноменологію нагріву бетону, пов’язану з фільтрацією, конденсацією та випаровуванням води у порах матеріалу, а також витрати теплової енергії на дегідратацію у цементному камені.

### 1.3. Особливості математичного моделювання напружено-деформованого стану будівельних конструкцій під час їх випробувань на вогнестійкість.

Задача моделювання зміни несучої здатності залізобетонних конструкцій при пожежі має за мету визначення граничних станів, при яких втрачається міцність, на будь-якій стадії нагріву чи охолодження.

За сучасними уявленнями для розгляду умов настання граничного стану необхідно досліджувати поведінку конструкцій у цілому [42, 50, 73, 74]. Таким чином, втрата міцності при пожежі статично-невизначеної залізобетонної конструкції відбувається у декілька етапів. На першому етапі відбувається втрата несучої здатності певного елемента, у результаті утворюється пластичний шарнір. На другому етапі після утворення пластичних шарнірів у декількох елементах статично невизначена конструкція втрачає стійкість, або перетворюється на геометрично змінну і обрушується. Таким чином, потрібно окремо розглядати настання першого граничного стану – втрату міцності окремого елемента, та другого граничного стану – втрату стійкості всієї конструкції.

За останній час розрахункові методики визначення несучої здатності окремих елементів залізобетонних конструкцій в умовах пожежі достатньо розроблені та інтенсивно розвиваються. Основні методики, що обґрунтовані багаточисельними експериментальними дослідженнями, це методика ВНДПО [9], методика викладена Eurocode [8] та методика Фоміна-Григор'яна [5, 39].

Згідно з методикою, розробленою у [9], фактичну несучу здатність нагрітих залізобетонних колон можна розрахувати за формулою:

$$N_{p,t} = \varphi(F_{я}R_{я}^{н} + F_{а}R_{а}^{н}\gamma_{а}), \quad (1.31)$$

де  $R_{ан}$  – нормативний опір робочої (повздовжньої) арматури;  $\gamma_{а}$  – коефіцієнт зниження нормативного опору арматури;  $F_{а}$  – площа перерізу робочої арматури;  $\varphi$  – коефіцієнт повздовжнього прогину;  $R_{ан}$  – нормативна призменна міцність бетону;  $F_{я}$  – площа ядра перерізу, обмеженого ізотермою з критичною температурою  $T_{кр}$ .

Дана методика дозволяє визначити настання першого граничного стану для колон на стадії розвитку пожежі, але при охолодженні її застосовувати не можна.

Методика представлена в нормативі [8] передбачає два способи розрахунку фактичної несучої здатності нагрітих залізобетонних колон – ізотермічний та зональний.

Ізотермічний метод подібний до методики [9] і стосується загального зменшення розміру поперечного перерізу з врахуванням температури пошкодженої зони поверхневого шару бетону.



Зональний метод передбачає поділ поперечного перерізу на декілька зон. Цей метод, хоч і більш трудомісткий, але більш точний ніж ізотермічний метод, особливо для колон. Метод придатний тільки для стандартного температурного режиму. Пошкоджений під час пожежі поперечний переріз представляється приведеним поперечним перерізом, який не включає товщину пошкодженої зони. Приведення поперечного перерізу базується на визначенні товщини пошкодженої зони (див. рис. 1.10.).

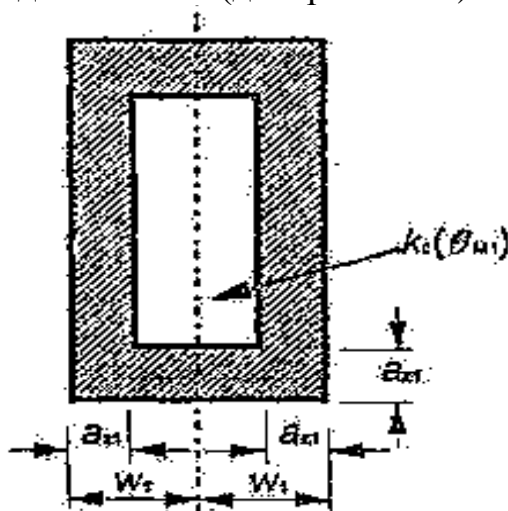


Рис. 1.10 – Зниження міцності та приведення поперечного перерізу для колони під вогневим впливом

Коли приведений поперечний переріз знайдено, а міцність та модуль пружності бетону під час пожежі визначено, розрахунок на вогнестійкість виконують за методикою розрахунку за нормальних температур з використанням значень коефіцієнту надійності матеріалу під час пожежі ( $\gamma_M, f_i$ ).

Інша методика розрахунку на вогнестійкість для стиснутих елементів набула розвитку у роботах Фоміна та Григор'яна. Ними була отримана формула, за якою визначається несуча здатність: центрально (1.32), відцентрово (1.33) та стиснутих залізобетонних колон [11]:

$$N_{ut} = \sum_i^n \sum_j^m \sigma_{bij} \cdot A_{bij} + \sum_i^k \sum_j^p \sigma_{sij} \cdot A_{sij} ; \quad (1.32)$$

$$N_{ut} = \varphi \left( \sum_i^n \sum_j^m \sigma_{bij} \cdot A_{bij} + \sum_i^k \sum_j^p \sigma_{sij} \cdot A_{sij} \right), \quad (1.33)$$

де  $\sigma_{bij}$  – граничні напруження елементів бетону, на які дискретизується переріз,  $\sigma_{sij}$  – граничні напруження елементів, що відповідають арматурі,  $A_{bij}$  – площа поперечного перерізу елементів бетону,  $A_{sij}$  – площа поперечного перерізу елементу сталевий арматури.

Розгляд роботи конструкцій в умовах пожежі можна знайти у роботі [7]. Майже всі розрахунки ведуться з використанням методу кінцевих

елементів (МКЕ). Цей метод набув в останній час широкого розповсюдження [75, 76] і реалізований у спеціальних багаточисельних програмних комплексах, які називаються FEM-системами.

Зважаючи на вищевикладене, можна зробити такі висновки, що моделювання граничних станів у елементах конструкцій та конструкцій у цілому при пожежі достатньо розвинене і відбувається з урахуванням феноменології деформування бетону в умовах підвищених температур. На сучасному етапі пріоритетним є розгляд моделювання граничного стану всієї конструкції з врахуванням сумісної роботи її елементів. При моделюванні розглядається задача стійкості у нелінійній постановці, що обумовлює застосування ЕОМ при розрахунку міцності конструкцій при пожежі. Найбільш зручним для описання роботи конструкцій та елементів є метод кінцевих елементів.

#### 1.4. Прикладне програмне забезпечення для моделювання процесу випробування на вогнестійкість несучих стін

Для моделювання теплових процесів серед проаналізованих програм більш прийнятною для побудови математичної моделі вогневої печі є система «FlowVision 2.5». По-перше, базовими в ній є рівняння Нав'є – Стокса, що описують рух рідин і газів у широкому діапазоні чисел Рейнольдса. По-друге, система дає змогу побудувати геометрію об'єкта в спеціалізованих САД-програмах. По-третє, система «FlowVision» уможливує легке корегування параметрів печі в процесі розрахунків. По-четверте, система «FlowVision» має розвинений апарат візуалізації отриманих результатів.

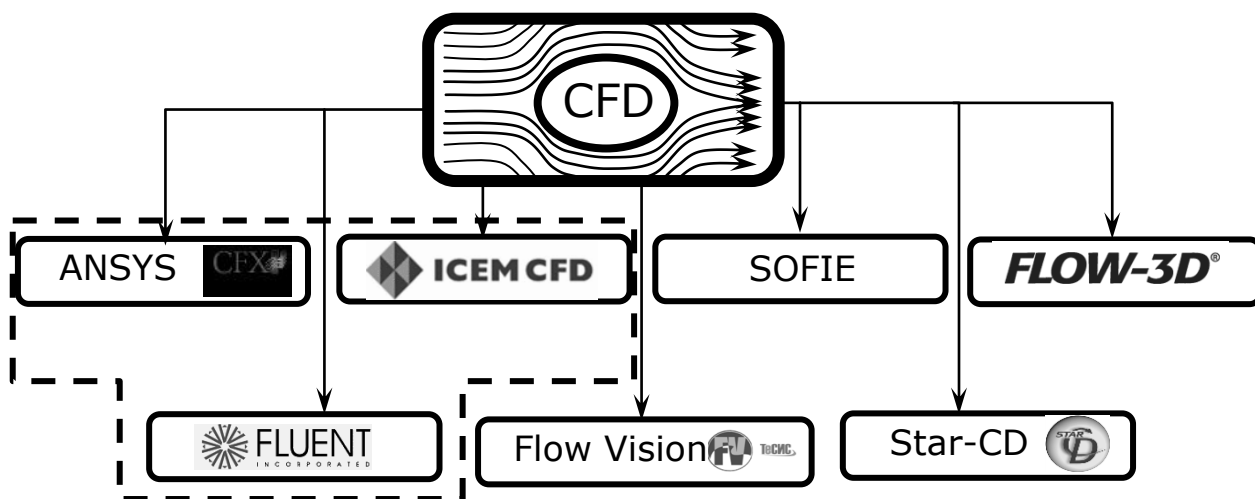


Рис. 1.11 – Сімейство програмних продуктів «CFD», поширених в Україні

## Характеристики CFD-програм

Назва програмного продукту (компанія, розробник)	Короткий опис	Примітка
1	2	3
«ANSYS CFX» («ANSYS», «Inc» (США)).	Пакет дає змогу розв'язувати широке коло завдань у сфері міцності, тепла, гідрогазодинаміки, електромагнетизму, а також міждисциплінарного аналізу, що об'єднує всі чотири галузі; оптимізувати конструкцію на основі всіх перерахованих типів аналізу [9–15].	
«ICEM CFD» («ANSYS», «Inc» (США)).	Комплексне розв'язання завдань із генерації розрахункових сіток будь-яких типів, від структурованої багатоблокової до неструктурованої гекса- або тетраедра чи гібридної [9].	
«FLUENT» («ANSYS», «Inc» (США)).	Сучасний програмний комплекс, що допомагає аналізувати широкий спектр промислових завдань, які стосуються динаміки рідини й газу (багатофазних, реагуючих) потоків з урахуванням теплообміну (кондуктивного, конвективного й радіаційного) [9–15].	
«SOFIE» («SP») («Technical Research Institute of Sweden» (Швеція)).	Використання моделей у межах вогневих випробувань має низку застосувань. Гранична умова в моделюваннях – визначення параметрів полум'я. «SP» має одну з найбільших баз даних у Європі та дає підстави для вибору джерела вогню, що буде використане в CFD-моделі [9–15].	
«STAR-CD» («CD-adapco group» (попередня назва – «Comp. Dynamics Ltd» (США)).	Ефективне паралелізування алгоритму рішення, заснованого на використанні методу кінцевих об'ємів, у поєднанні з унікальними методиками автоматизованого розбиття області течії дають змогу моделювати завдання будь-якого ступеня геометричної складності [13].	Застосовують переважно для моделювання поширення вогню [13].

«FLOW-3D» («Flow Science Inc») (США).	Застосовують для точного математичного моделювання процесів гідродинаміки й теплообміну; для розрахунку обмежених і з вільною поверхнею перебігу рідин (турбулентне та ламінарне), гідравлічних ударів, навколосвукового й надзвукового перебігу газів, температурних режимів, фільтрації, обтікання твердих тіл довільної конфігурації та перебігу сумішей. Моделювання завдань конвекції, кавітації, кристалізації, плавлення, теплоперенесення й ін. [9–15].	Широко використовують у металургійному виробництві для всіх способів лиття [9–15].
«CFD FlowVision» (Тесис (РФ)).	У теоретичній базі системи «FlowVision» розвинено узагальнений підхід, заснований на усереднюванні за часом (усереднювання за Рейнольдсом) повної системи рівнянь Нав'є – Стокса. Для розв'язання системи рівнянь застосовують метод контрольних об'ємів [8].	

«FlowVision» призначена для розрахунку гідро- й газодинамічних завдань (разом із пов'язаними процесами тепло - та масоперенесення) у широкому діапазоні чисел Рейнольдса й Маха в довільних тривимірних областях.

Базовими в «FlowVision» є рівняння Нав'є – Стокса (разом із рівнянням нерозривності). Для замикання цих рівнянь, залежно від конкретного завдання, використовують додаткові співвідношення, що описують зміну густини, турбулентне перенесення та ін. Набори цих співвідношень у сукупності з рівняннями Нав'є – Стокса називають моделями. У «FlowVision» найбільш повно представлені такі моделі [8]:

- наближення Буссінеска (малі зміни густини) для опису ламінарної течії в'язкої рідини за малих чисел Рейнольдса;
- k-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини з невеликими змінами густини за великих чисел Рейнольдса;
- модель слабо стисливої рідини (у термінології «FlowVision»), що дає змогу розраховувати стаціонарний дозвуковий рух газу за будь-яких змін густини;
- модель повністю стисливої рідини (у термінології «FlowVision»): стаціонарний і нестаціонарний рух за будь-яких чисел Маха (до-, транс-, над- і гіперзвукові течії).

«FlowVision» допускає також використання моделі теплоперенесення у твердому тілі, що поєднане з перенесенням тепла й речовини в рідині (газі).

Крім того, у «FlowVision» включені кілька спеціальних моделей (безпосередньо не пов'язаних із рівняннями Нав'є – Стокса), із яких до

базової навчальної версії пакету входять тільки моделі вільної поверхні, двофазного потоку й одна з моделей горіння.

Для моделювання напружено-деформованого стану найбільш доцільно використовувати програмний комплекс «ANSYS CFX». Пакет дає змогу розв'язувати широке коло завдань у сфері міцності, тепла, гідрогазодинаміки, електромагнетизму, а також міждисциплінарного аналізу, що об'єднує всі чотири галузі; оптимізувати конструкцію на основі всіх перерахованих типів аналізу.

Таким чином, змодельовавши процес тепломасообміну у камері вогневої печі у програмному комплексі «FlowVision», можна отримати розподіл температур на обігрівальній поверхні несучої стіни. Отримані дані використати як вхідні для розрахунку напружено-деформованого стану у програмному комплексі «ANSYS CFX», застосувавши граничні умови I роду, проводити оцінку межі вогнестійкості несучих стін.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ЗАСНОВАНІ НА ВИКОРИСТАННІ ПОВНОЇ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ НАВ'Є – СТОКСА, ДЛЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ІЗ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТІН

#### 2.1. Особливості комп'ютерних моделей тепломасообміну у вогневих печах під час випробування несучих стін на вогнестійкість

У першому розділі обґрунтовано, що сучасне програмне забезпечення, зокрема моделювання теплових процесів засобами обчислювальної газогідродинаміки («CFD»), дає змогу враховувати всі необхідні параметри аналізованих процесів і досліджувати вплив геометричних та конструктивних характеристик печі для випробувань залізобетонних конструкцій на адекватність результатів.

Серед проаналізованих програм більш прийнятною для побудови математичної моделі вогневої печі є система «FlowVision 2.5». По-перше, базовими в ній є рівняння Нав'є – Стокса, що описують рух рідин і газів у широкому діапазоні чисел Рейнольдса. По-друге, система дає змогу побудувати геометрію об'єкта в спеціалізованих САД-програмах. По-третє, система «FlowVision» уможливорює легке корегування параметрів печі в процесі розрахунків. По-четверте, система «FlowVision» має розвинений апарат візуалізації отриманих результатів.

Для демонстрації алгоритму створення та можливостей математичної моделі, проаналізовано дві спеціальні установки, які використовують для випробувань несучих стін на вогнестійкість (рис. 2.1). Як інструмент для побудови геометрії моделей використано демоверсію програмного комплексу «SolidWorks». Розміри моделей відповідають реальним розмірам вогневих печей.

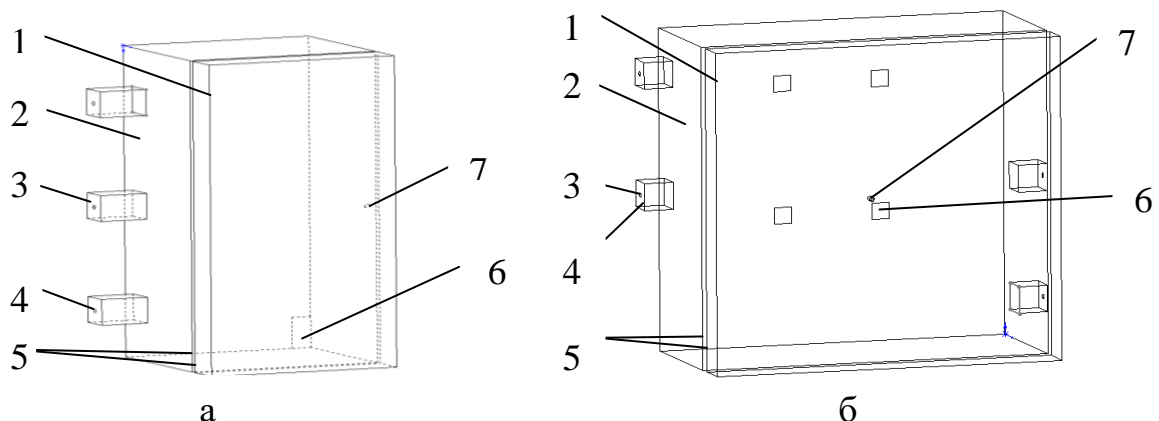


Рис. 2.1 – Геометрична конфігурація вертикальних печей (а – ПП «Випробувальний центр «ТЕСТ» (далі – Лаб. 1) (зображено лише симетричну половину) та б – ТОВ «ПожТест» (далі – Лаб. 2): 1 – огороження печі; 2 – фрагмент стіни; 3 – регіон вдуву; 4 – регіон форсунки; 5 – поверхні, що сполучаються; 6 – регіон виходу продуктів горіння; 7 – розрахункова область термопари

**Габаритні розміри установок для випробувань  
на вогнестійкість несучих стін**

Назва печі	Розміри вогневої камери, мм			Кількість пальників у печі	Джерело
	ширина	висота	глибина		
випробувальна піч Лаб. 1	3000	3000	1,2	6	[12]
випробувальна піч Лаб. 2	3000	3000	1,5	4	

До основних принципів побудови математичної моделі належать такі:

1) як основний інструмент побудови моделі та проведення чисельного експерименту використано програмний комплекс «FlowVision 2.5»;

2) у процесі чисельного експерименту враховано конвективний і радіаційний теплообмін поверхні випробуваних конструкцій та простору камери печі;

3) у камерах передбачена модель термопари у вигляді стержня довжиною 100 мм і діаметром 6 мм з урахуванням конвективного та радіаційного теплообміну;

4) використано симетричну половину вогневої печі лабораторії Лаб 1, що збільшує продуктивність розрахунку.

Після створення геометричних моделей їх імпортують до середовища програмного комплексу «FlowVision».

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

Препроцесор виконує такі основні функції:

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

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

– уведення параметрів розрахункової сітки й методу для чисельного розв'язання задачі.

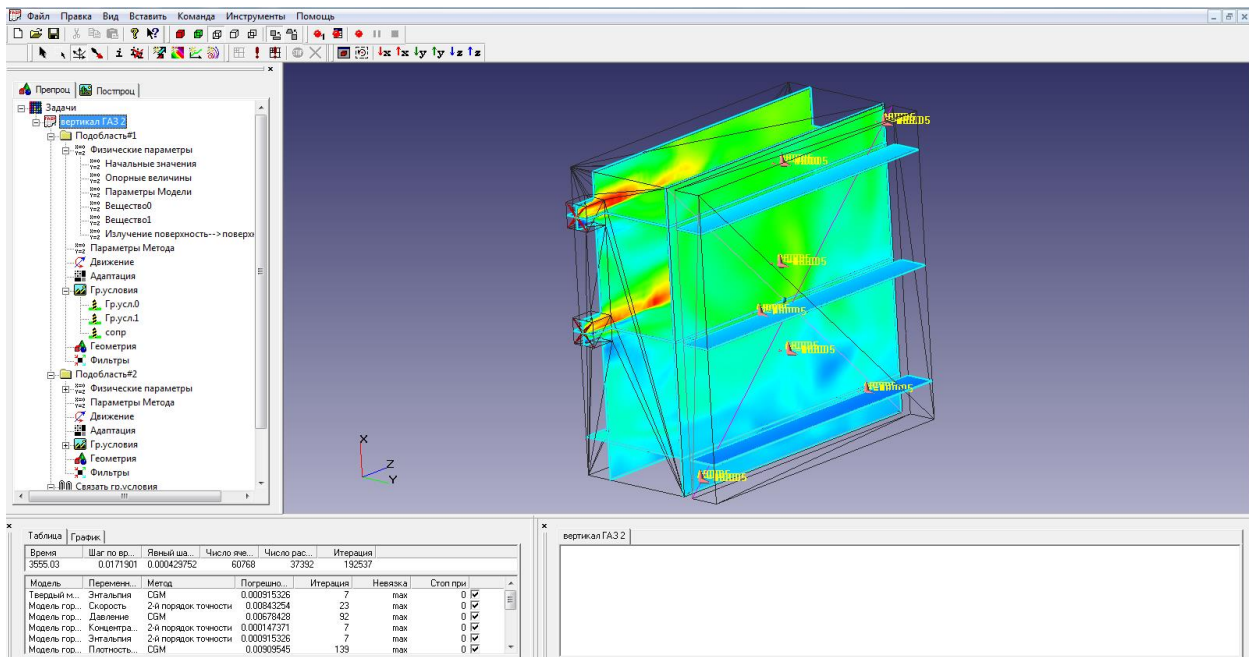


Рис. 2.2 – Интерфейс программного комплексу «FlowVision 2.5»

Солвер уможливилює чисельний розв'язок окресленої задачі.

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

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

- умови прилипання або прослизання рідини, що задані для вектора швидкості на межах із твердими тілами;
- умови на значення тиску, зазвичай задані на межах;
- умови на значення швидкості потоку по нормалі до кордону або під кутом до нормалі;
- умова витікання з нульовим градієнтом тиску (вільний вихід);
- комбінації умов, перерахованих вище, наприклад, вільне витікання рідини з нульовими градієнтами тиску і швидкості або задані на межах значення тиску та швидкості.

Варто зауважити, що конкретні граничні умови, як і значення параметрів рівнянь (щільність, в'язкість, теплопровідність та ін.), можуть бути задані змінними за часом.

Початкові умови необхідно задавати в разі характеристики моделей, що відповідають нестационарним рухам. Залежно від виду моделюючих рівнянь, у початковий момент часу в усіх точках розрахункової області задають



значення аналізованих функцій і (або) деяких похідних від них, причому ці значення можуть бути різними в різних її частинах.

Для чисельного рішення базових рівнянь у «FlowVision» використовують метод, заснований на консервативних схемах розрахунку нестационарних рівнянь у часткових похідних, які порівняно з неконсервативними схемами дають рішення, що точно задовольняють закони збереження (зокрема рівняння нерозривності). За бажанням користувача для розв'язання записаної системи лінійних алгебраїчних рівнянь може бути використаний як неявний (більш надійний), так і явний (швидше працює, але розходиться за умови великих кроків за часом) варіант ітераційного процесу. Метод базований на ейлеревому підході до опису руху рідини, сутність якого полягає в тому, що різні скалярні й векторні величини постають як функції змінних Ейлера часу та координат точки в нерухомій системі координат [43].

Після введення параметрів математичної моделі підобласть камери печі сполучається з конструкцією та термопарою. Крім того, вводять загальні параметри, такі як: вісь гравітації, критерій Куранта – Фрідрікса – Леві [6] тощо.

Наступний етап полягав у створенні сіткової моделі печі. Метод контрольних об'ємів, що застосований у програмному комплексі, має певні особливості.

Таблиця 2.2

**Початкові параметри граничних умов вогневих печей та залізобетонних конструкцій у процесі випробування на вогнестійкість**

№, з/п	Підобласть	Регіон підобласті	Тип граничної умови згідно з номенклатурою «FlowVision 2.5»	Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
1.	Простір камери печі	Огорожа печі	Стінка	Щільність енергії випромінювання	Радіаційний потік ураховано	
		Регіон вдуву	Вхід / вихід	Температура	°C	23
	Швидкість			кг/(м <sup>2</sup> с)	7	
	Турб. енергія				0,03	
	Турб. дисипація				0,001	
			O <sub>2</sub> Відновлений		0,2333	
Регіон форсунки	Стінка	Тип граничної умови	част.+норм. швидкість			

Продовження таблиці 2.2

				Потік часток	кг/с	змін. від 0,0011 до 0,01	
				Температура часток	°C	23	
				Діаметр часток	м	0,0001	
				Масова частка		1	
				Чорнота часток		0,5	
				Нстарт точок		100	
				Швидкість часток	м/с	10	
	Регіон димового люку	Вільний вихід	За умовчанням				
		Поверхня, що сполучається з конструкцією	Поєднане	Тип граничної умови	L-поєднання		
		Поверхня, протилежна поверхні з форсунками	Симетрія	За умовчанням			
		Поверхня, що сполучається з термопарою	Поєднане	Тип граничної умови	L-поєднання		
2.	Стіна	Поверхня, що сполучається з камерою печі	Поєднане	Тип граничної умови	L-поєднання		
		Інші поверхні конструкції	Симетрія	За умовчанням			
3.	Термопара	Торцева поверхня з боку спаю й бокова поверхня термопари	Поєднане	Тип граничної умови	L-поєднання		
		Торцева поверхня термопари	Симетрія	За умовчанням			

Чисельне інтегрування рівнянь за просторовими координатами проводять із використанням прямокутної, адаптивної, локально подрібненої сітки. Такий підхід уможливує, з одного боку, використання простої рівномірної неадаптивної сітки під час виконання завдань із порівняно нескладною геометрією. З іншого боку, з'являється змога в процесі розв'язування задач зі складною геометрією проводити адаптацію

підлаштування сітки до особливостей геометрії поблизу граничних умов, а в ході розв'язування задач із розривними течіями – адаптацію за значеннями аналізованих функцій, їхніх градієнтів та ін.

Процедура локального подрібнення сітки в області адаптації передбачає послідовний розподіл: із вихідної, кожної попередньої комірки на 4 більш дрібні осередки (у тривимірному випадку на 8) до виконання умови адаптації (наприклад, досягнення заданої точності обчислення градієнта аналізованої функції).

Для того, щоб врахувати конвективний і радіаційний теплообмін поверхні термопари і простору камери печі, адаптивну сітку для термопари було значно подрібнено.

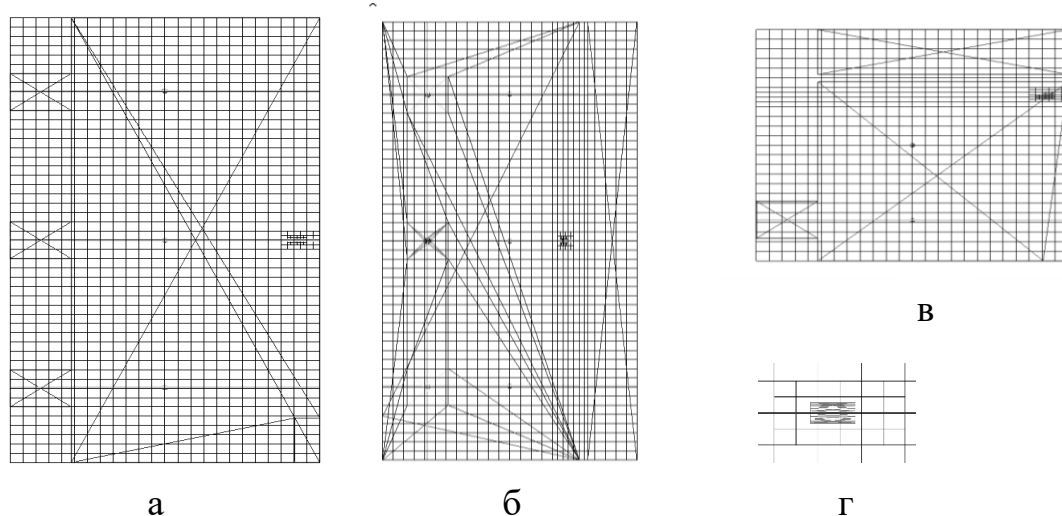


Рис. 2.3 – Сіткова модель простору вертикальної печі Лаб. 1 (показано лише симетричну половину): а – вид по осі Y; б – вид по осі X; в – вид по осі Z; г – адаптивна сітка для термопари (вид на бокову поверхню термопари)

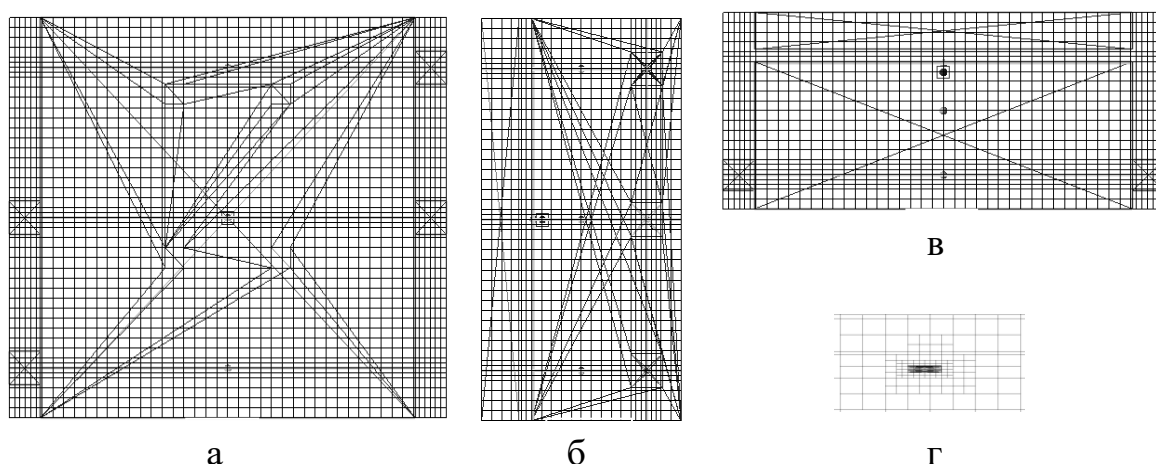


Рис. 2.4 – Сіткова модель простору вертикальної печі Лаб. 2: а – вид по осі Y; б – вид по осі X; в – вид по осі Z; г – адаптивна сітка для термопари (вид на бокову поверхню термопари)

Між точністю розрахунку й кількістю розрахункових комірок існує прямо пропорційна залежність, а між кількістю комірок і часом, за який буде проведений розрахунок, – обернено пропорційна. Тому потрібно обрати баланс між необхідною точністю розрахунку та часом, який буде витрачений на проведення розрахунку.

Для врахування конвективного та радіаційного теплообміну поверхні термомпари і простору камери печі, адаптивну сітку для термомпари значно подрібнено. Для цього створено адаптацію в місці розташування термомпари.

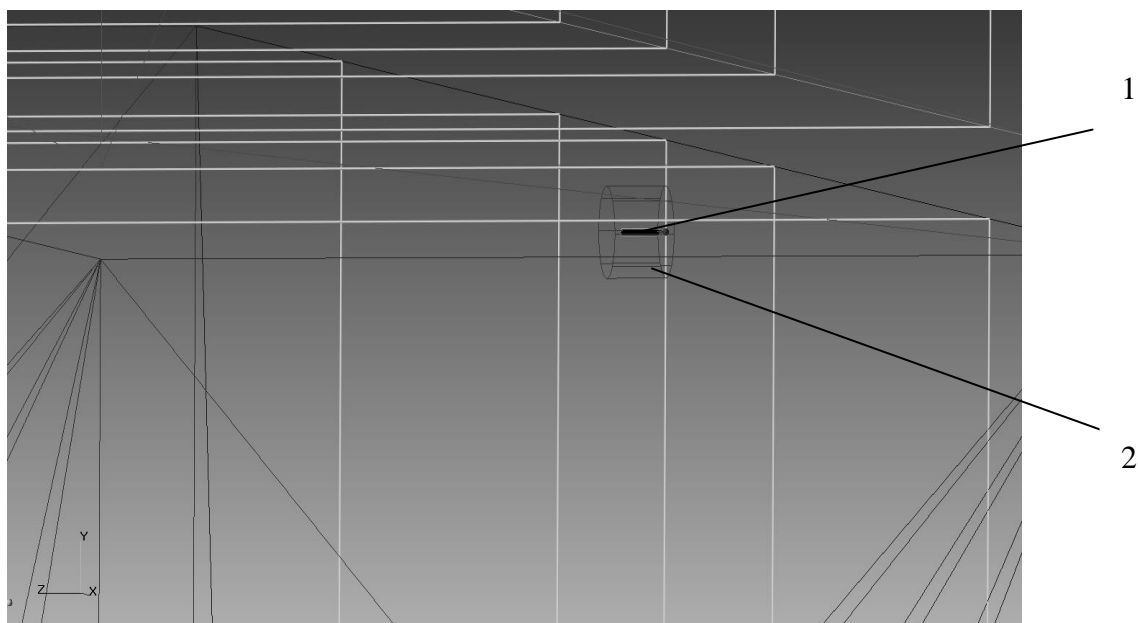


Рис. 2.5 – Циліндричний регіон адаптації сітки для термомпари в камері печі: 1 – модель термомпари; 2 – циліндричний регіон адаптації

Для врахування особливості, яка полягає в наявності моделі термомпари, створена двоступінчата адаптація спочатку 1 рівня по простору циліндра, що охоплює термомпару радіусом 0.01 м і заввишки 0.12 м та 1 рівня по простору підобласті термомпари.

Температура, яку реєструє термомпара печі, залежить від конвективного і променевого теплообміну між поверхнею термомпари та простором камери печі. На практиці термомпара підлаштовується до температури, яка створює баланс між теплом, індукованим конвективно, і теплом, що надходить унаслідок випромінювання.

**Параметри розрахунку теплообміну у вогневій печі  
під час випробовування залізобетонної конструкції (плити)  
на вогнестійкість моделі в системі «FlowVision 2.5»**

Параметр мат. моделі	Особливість	Дані параметра
Розрахункова сітка	Повинна бути достатньо дрібною, водночас забезпечувати необхідну продуктивність розрахунку.	У печі ПП «Випробувальний центр «ТЕСТ»: 27 154 розрахункові осередки. У печі ТОВ «ПожТест»: 53 328 розрахункові осередки.
Адаптація розрахункової сітки	Адаптація застосована для врахування особливості термопари.	Адаптація навколо циліндра, який охоплює термопару радіусом 0,01 м і висотою 0,12 м рівня 1. Адаптація по простору підобласті термопари рівня 1.
Розрахункова схема	Схема обчислювального алгоритму.	Неявна схема.
Глобальний часовий крок	Установлюють для забезпечення коректності розрахунку.	Заданий шляхом уведення константи, пов'язаної з критерієм Куранта – Фрідрікса – Леві $CFL = 1$ у початкових етапах ініціації горіння $CFL = 15$ , для усталеного процесу горіння. У разі зупинки горіння, коли форсунки вимикаються після вигорання всіх часток палива й зупинки вдуву $CFL = 35$ .
Крок часу для процесу нагрівання конструкції	Установлюють унаслідок великої різниці між швидкоплинністю процесів теплопередачі в твердому тілі й тепломасообміну в печі.	Установлюють методом добору з урахуванням правдоподібності прогріву колони. Установлено «Свій крок за часом» «Крок: 0,12».
Крок часу для процесу нагрівання термопари	Установлюють унаслідок великої різниці між швидкоплинністю процесів теплопередачі в твердому тілі й тепломасообміну в печі.	Установлюють методом добору з урахуванням правдоподібності прогріву плити. Установлено «Свій крок за часом» «Крок: 0,8»

Таблиця 2.4

**Теплофізичні характеристики матеріалів й умови конвекційного та радіаційного теплообміну**

Характеристика	Одиниці вимірювання	Величина	Джерело
Теплофізичні характеристики матеріалу несучої стіни (бетон)			
Коефіцієнт теплопровідності	Вт/(м·К)	$1,2 - 0,00035 \cdot T$	[66–68]
Питома теплоємність	Дж/(кг·К)	$710 + 0,083 \cdot T$	[66–68]
Густина	кг/м <sup>3</sup>	2300	[66–68]
Ступінь чорноти	-	0,85	[66–68]
Теплофізичні характеристики матеріалу термопари (сталь)			
Коефіцієнт теплопровідності	Вт/(м·К)	45	[66–68]
Питома теплоємність	Дж/(кг·К)	450	[66–68]
Густина	кг/м <sup>3</sup>	7000	[66–68]
Ступінь чорноти	-	0,7	[66–68]
Загальні величини			
Стала Стефана – Больцмана	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	$5,67 \cdot 10^{-8}$	[66]

У табл. 2.5 систематизовано параметри математичної моделі процесів тепломасообміну печі для випробувань на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій, згідно з номенклатурою «FlowVision 2.5» [44].

Таблиця 2.5

**Параметри математичних моделей газодинаміки печі для випробувань на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій, згідно з номенклатурою «FlowVision 2.5»**

Математична модель	Теоретична база	Назва моделі згідно з номенклатурою «FV 2.5»
Модель механіки руху газів.	Система рівнянь Нав'є – Стокса.	Модель 2Фазного горіння; Швидкість.
Модель газу.	Ідеальний газ.	Ідеальний газ.
Модель теплоперенесення.	Рівняння енергії.	Енергія.
Модель турбулентності.	Стандартна k - ε.	Турбулентність. Стандартна модель k-ε.
Модель реагуючого потоку.	Двофазний потік рідких частинок.	Частки.
Математична модель	Теоретична база	Назва моделі згідно з номенклатурою «FV 2.5»
Модель хімічної реакції.	Одноступінчата хімічна бруто-реакція формула.	5 газів.

Модель горіння.	Модель Магнуссена (турбулентна модель)	Модель горіння Магнуссена.
Модель випромінювання газу в об'ємі.	Дифузна модель (P1).	Випромінювання. Дифузна модель (P1).
Модель теплопередачі у твердих тілах.	Рівняння теплопровідності.	Твердий матеріал. Енергія.
Модель радіаційного теплообміну між поверхнями моделей.	Рівняння радіаційного теплоперенесення.	ПП випромінювання.
Метод чисельної реалізації.	Метод контрольних об'ємів.	Базовий метод реалізації розрахунку «FV 2.5».

Сутність проведення чисельного експерименту полягає в ініціації процесу горіння з контролем температури в середині моделі термопари так, щоб температурний режим її нагріву по можливості точно співпадав з стандартною температурною кривою пожежі [1]. Для цього засобами контролю системи FlowVision в інтерактивному режимі знімаються поточні дані з термопари, і при досягненні максимальної температури для певного кроку за часом параметри процесу горіння змінюються. Потім процедура зміни параметрів процесу горіння повторюється для наступного часового інтервалу. При цьому фіксуються дані про температуру поверхні, арматурного шару і середини залізобетонного виробу для даного інтервалу.

Для проведення обчислювального експерименту з використанням створеної математичної моделі вогневої печі для випробувань використана нижченаведена послідовність розрахункових процедур.

1. Ініціюється процес горіння.
2. Значення температури термопари візуалізується і контролюється порівнянням для часового кроку випробувань.
3. При досягненні температури термопари відповідної температури стандартного температурного режиму пожежі для даного інтервалу параметри процесу горіння змінюються.
4. Після вигорання всіх частинок палива (визначається по температурі факелів) встановлюється ще більш грубий крок до настання наступного тимчасового інтервалу.
5. Для наступного часового інтервалу розрахункові процедури повторюються.
6. При проведенні розрахунку контролюється температура відповідних точок стіни і простору печі.

Для цього засобами контролю системи FlowVision 2.5 в інтерактивному режимі знімалися поточні дані з термопари, і, при досягненні максимальної температури для певного кроку за часом, параметри процесу горіння змінювалися. Дані щодо температури у місцях вказаних на рис. 2.6 та рис. 2.7

фіксувалися щосекунди для досягнення необхідної точності при побудові графіків.

Окрім змодельованих термопар, показники температури зафіксовано в камерах печей та в залізобетонних стінах на необігрівальних поверхнях, обігрівальних поверхнях і на рівні арматури, як це відтворено на слайді. Таких місць 24 у вертикальній печі та 39 у горизонтальній (рис. 2.6, рис. 2.7).

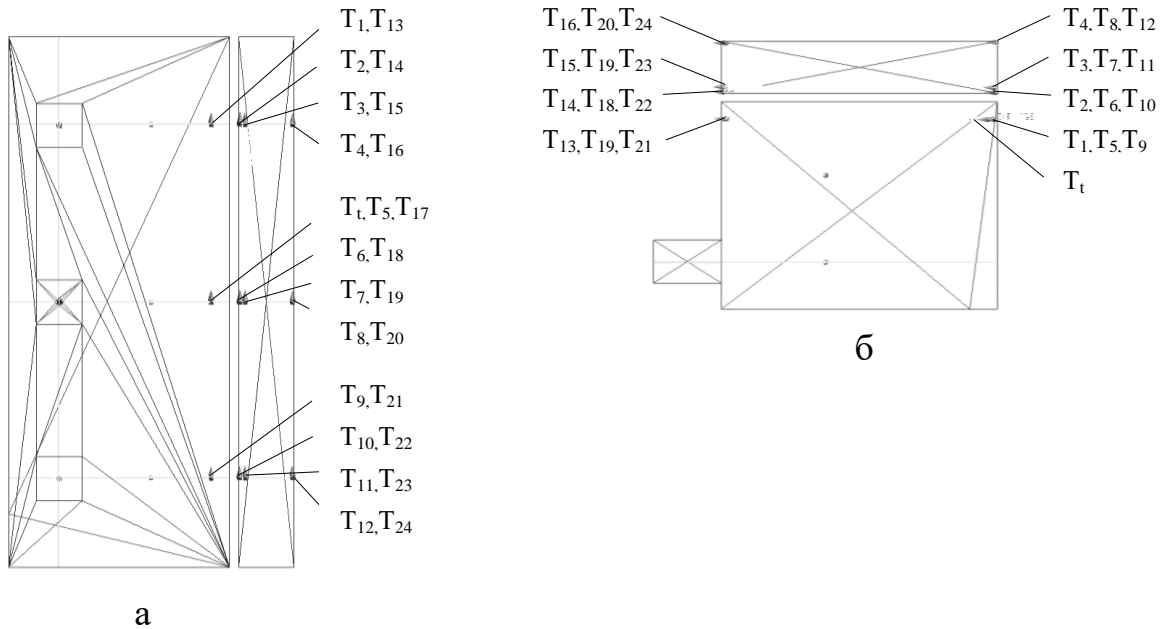


Рис. 2.6 – Місця, де відбувався контроль температури при моделюванні печі Лабораторії 1 (показано лише симетричну половину):  $T_t, T_1-T_{24}$  – місця де відбувалося зняття температури; а – вид по осі X; б – вид по осі Z

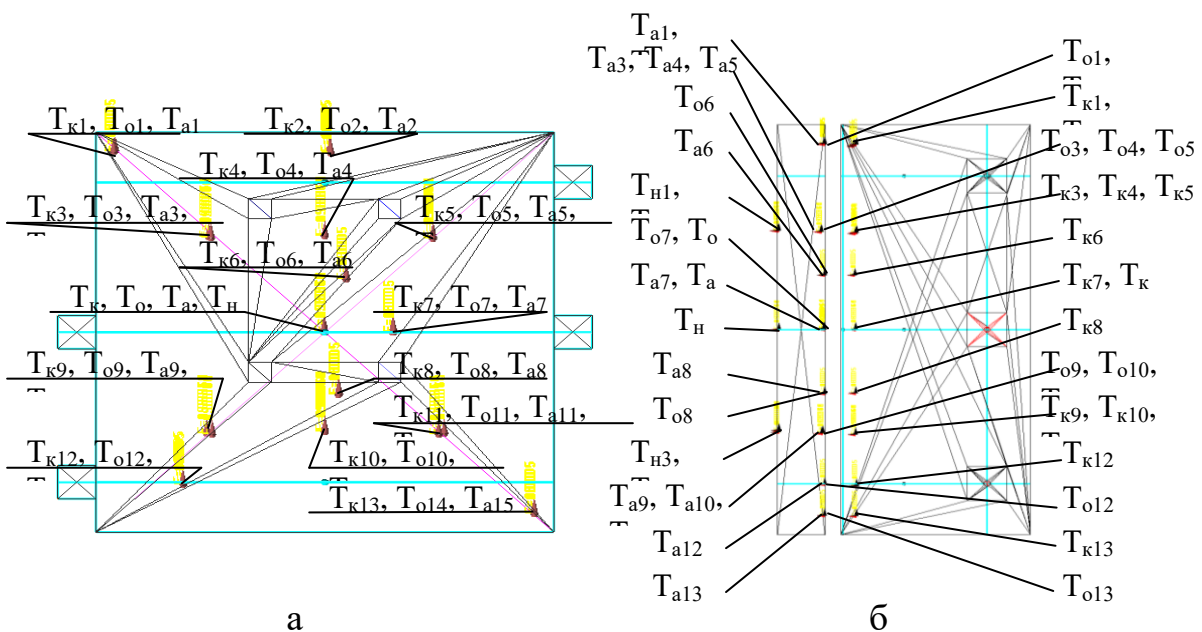


Рис. 2.7 – Місця, де відбувався контроль температури при моделюванні печі Лабораторії 2:  $T_a, T_k, T_n, T_o$  – місця, де відбувалося зняття температури; а – вид по осі Y; б – вид по осі Z



Місця контролю температури обрані за такими принципами:

- у місцях розміщення термопар у реальних установках для дотримання стандартного температурного режиму пожежі [1], аналогічно до того, як це відбувається в реальних установках;
- місця над пальниками камери печі, на відстані 100 мм від залізобетонної плити;
- місце безпосередньо поряд із моделлю термопар, для вивчення її інертності;
- у камері горизонтальної печі додатково контролювана температура між пальниками на відстані 100 мм від залізобетонної плити, для коректного дотримання стандартного температурного режиму [1] та подальшого аналізу розподілу температур у камері печі;
- на обігрівальній поверхні конструкції, необігрівальній поверхні конструкції та в арматурному шарі плит, у місцях, які відповідають проекціям місць заміру температури в камері печі на відповідні площини.

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

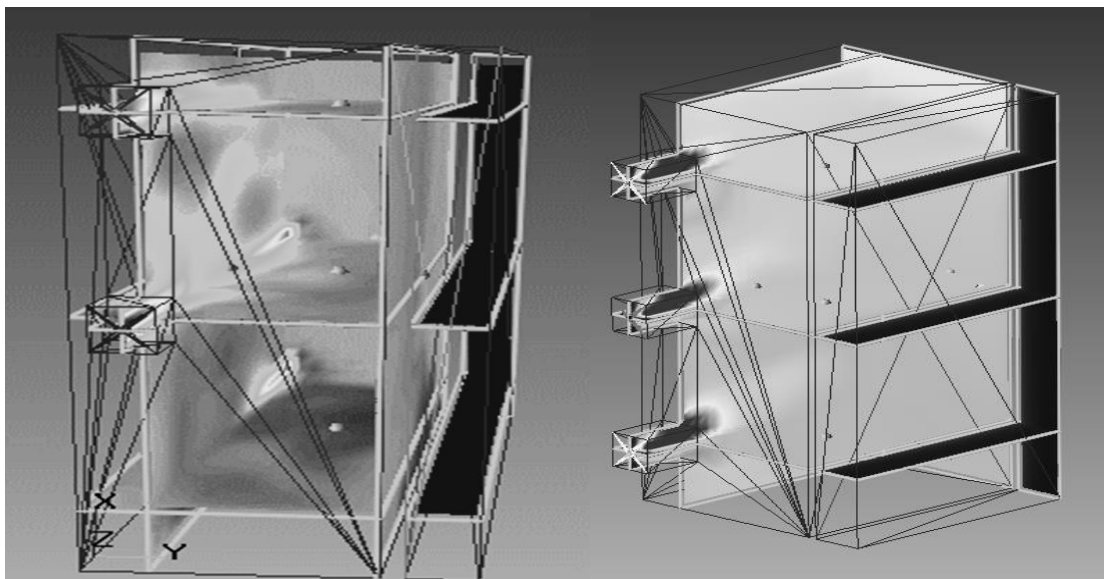


Рис. 2.8 – Візуалізація процесу горіння засобами програмного комплексу «FlowVision 2.5»

## **2.2. Методика проведення обчислювального експерименту з випробування залізобетонних конструкцій на вогнестійкість**

Сутність проведення обчислювального експерименту полягає в ініціації процесу горіння з контролем температури в середині камери змодельованої печі в такий спосіб, щоб температурний режим нагріву якомога точно збігався з температурною стандартною кривою пожежі. Для цього засобами контролю системи «FlowVision» в інтерактивному режимі зафіксовано

поточні дані з місць контролю температури, описаних у розділі 2.3. У разі досягнення максимальної температури для певного кроку за часом параметри процесу горіння змінюються. Потім процедура зміни параметрів процесу горіння повторюється для наступного часового інтервалу (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

**Параметри граничних умов та проведення розрахунку  
для дослідження початкової стадії випробування**

№ з/п	Дія	Параметри, що змінюються	Час, с	Т-ра ст-го реж.
1.	Ініціалізація горіння та розрахунок його початкових стадій.	Параметри, зазначені в табл. 2.2.	10	151
	Після досягнення температури припинення горіння.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.05 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.		
	Перерозподіл потоків за відсутності горіння вдуву й тяги.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=35. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.37. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 1.		
2.	Ініціалізація горіння й розрахунок його початкових стадій.	Форсунка: Потік часток 0.0012. Вдув: швидкість 7 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=1-10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.	20	219

	Після досягнення температури припинення горіння.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.05 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.		
	Перерозподіл потоків за відсутності горіння, вдуву й тяги.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=35. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.37. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 1.		
3.	Ініціалізація горіння й розрахунок його початкових стадій.	Форсунка: Потік часток 0.0012. Вдув: швидкість 7 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=1-10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.	30	266
	Після досягнення температури припинення горіння.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.05 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.		
3.	Перерозподіл потоків за відсутності горіння, вдуву й тяги.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=35. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.37. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 1.		

4.	Ініціалізація горіння розрахунок його початкових стадій.	Форсунка: Потік часток 0.0012. Вдув: швидкість 7 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с) Глобальний крок: CFL=1-10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.	40	301
	Після досягнення температури припинення горіння.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.05 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.		
	Перерозподіл потоків відсутності горіння, вдуву й тяги.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=35. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.37. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 1.		
5.	Ініціалізація горіння розрахунок його початкових стадій.	Форсунка: Потік часток 0.0035. Вдув: швидкість 7 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=1-10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.	50	330
	Після досягнення температури припинення горіння.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.05 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.		

	Перерозподіл потоків за відсутності горіння, вдуву й тяги.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=35. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.37. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 1.		
б.	Ініціалізація горіння та розрахунок його початкових стадій.	Форсунка: Потік часток 0.0035. Вдув: швидкість 7 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=1-10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.		
	Після досягнення температури припинення горіння.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0.1 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0.05 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=10. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.12. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.8.	60	354
	Перерозподіл потоків за відсутності горіння, вдуву й тяги.	Форсунка: Потік часток 0. Вдув: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Тяга: швидкість 0 кг/(м <sup>2</sup> с). Глобальний крок: CFL=35. Стіна: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 0.37. Термопара: Параметри методу: Свій крок за часом: Крок 1.		

Для демонстрації методики проведення обчислювального експерименту обрано початкову ділянку стандартної температурної кривої в межах однієї хвилини випробувань. Цей проміжок схарактеризований із таких міркувань:

- 1) потрібне відпрацювання процедури обчислювального експерименту для створення алгоритму дослідження процесу вогневих випробувань;
- 2) необхідне корегування даних обчислювального процесу для отримання адекватних результатів експерименту;

3) потрібний аналіз початкових стадій ініціації й розвитку горіння в нагрівальних каналах, оскільки такі процеси, як правило, не контролюють у ході випробувань.

Для проведення обчислювального експерименту з використанням створеної математичної моделі вогневої печі дотримано послідовності розрахункових процедур, що описана нижче:

1) ініціація процесу горіння з мінімальним глобальним кроком за часом (табл. 2.3);

2) візуалізація значення температури термопари та контроль порівняння для часового кроку випробувань (дібране оптимальне значення 10 с);

3) установлення більш грубого кроку після 0,05 с;

4) досягнення температури, що відповідає температурі стандартного температурного режиму пожежі для цього часового кроку, припинення процесу горіння установкою відповідних ГУ;

5) установлення ще більш грубого кроку після вигорання всіх часток палива (визначають за температурою факелів) до наступного часового інтервалу;

6) повторення розрахункових процедур для наступного часового інтервалу;

7) контроль температури точок конструкції і простору печі під час проведення розрахунку.

### **2.3. Результати обчислювальних експериментів із випробувань на вогнестійкість у комп'ютерних моделях вогневих печей**

Для отримання відпрацьованої методики чисельного експерименту проведено попередні розрахунки для створених комп'ютерних моделей та одержано такі граничні умови й параметри обчислювального процесу, за яких досягають оптимальної продуктивності розрахунку та адекватності його результатів.

На рис. 2.9 продемонстровано графік зміни показників температури термопари за час обчислювального експерименту у вогневих печах.

Під час обчислювального експерименту контроль температури організований так, щоб середня температура в камері змодельованої печі якомога точно збігалася з температурною стандартною кривою пожежі й не виходила за допустимі межі випробування [1]. Для цього засобами контролю системи «FlowVision 2.5» в інтерактивному режимі зафіксовано поточні дані з термопари. У разі досягнення максимальної температури для певного кроку за часом параметри процесу горіння змінювалися. Дані щодо температури в місцях, зображених на рис. 2.6, рис. 2.7, зафіксовано щосекунди для досягнення необхідної точності в ході побудови графіків.

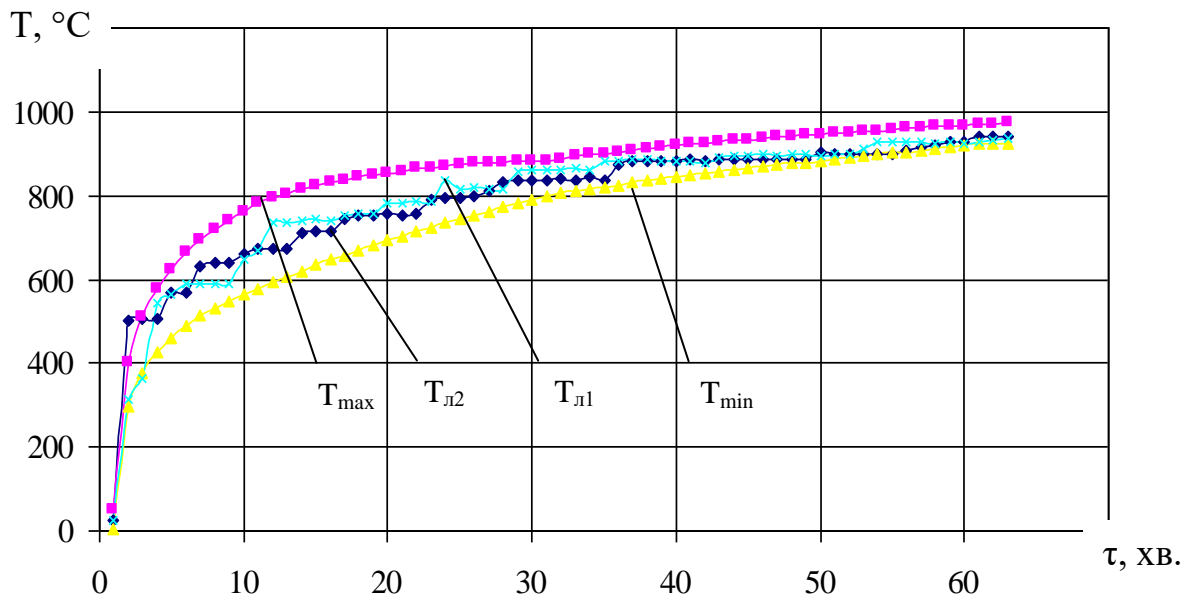


Рис. 2.9 – Графік зміни температури всередині змодельованої термопарі в камерах горизонтальної та вертикальної вогневих печей:  $T_{л1}$  – показники всередині змодельованої термопарі в камері печі Лаб. 1 (рис. 2.6);  $T_{л2}$  – показники всередині змодельованої термопарі в камері печі Лаб. 2 (рис. 2.7);  $T_{max}$  – верхня межа випробувань;  $T_{min}$  – нижня межа випробувань

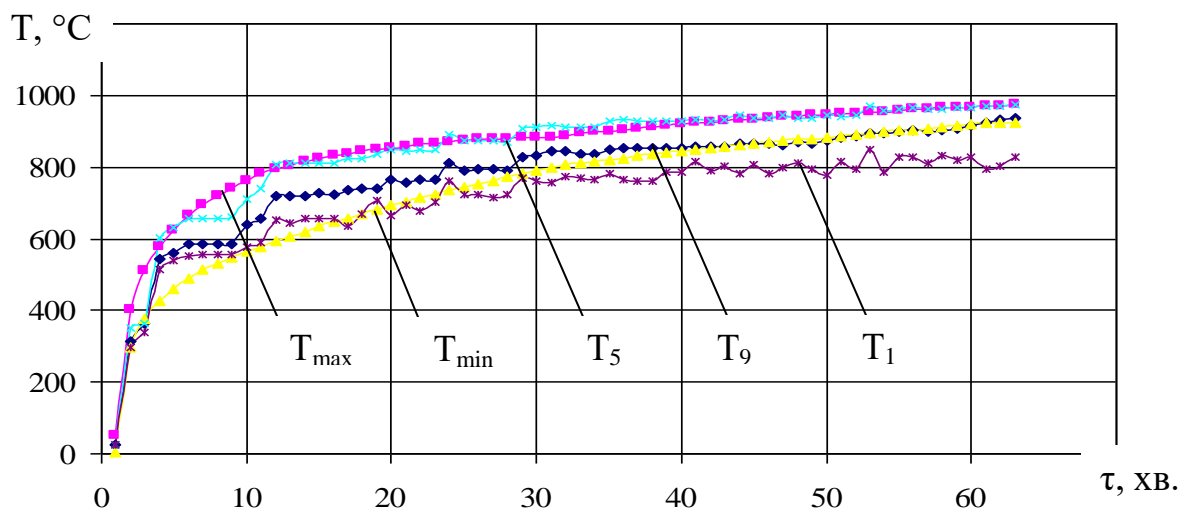


Рис. 2.10 – Графік зміни температури в різних місцях камери печі Лаб. 1:  $T_{max}$  – верхня межа випробувань;  $T_{min}$  – нижня межа випробувань;  $T_5$  – показники температури у верхній частині печі;  $T_9$  – показники температури в середній частині печі;  $T_1$  – показники температури в нижній частині печі (рис. 2.6)

T, °C

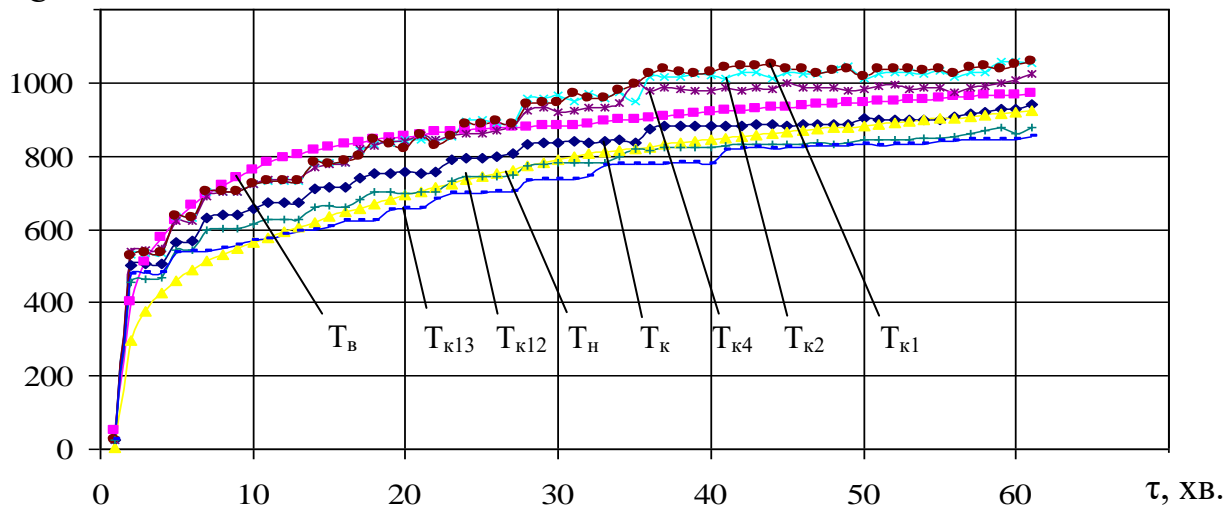


Рис. 2.11 – Графік зміни температури в печі Лаб. 2:  $T_{\max}$  – верхня межа випробувань;  $T_{\min}$  – нижня межа випробувань;  $T_{11}$ ,  $T_{13}$ ,  $T_{14}$ ,  $T_{19}$ ,  $T_{\Gamma}$  – показники всередині змодельованої термопары в камері горизонтальної печі (рис. 2.7)

Стандартна температурна крива пожежі [1] на 60-й хвилині показує температуру 945 °C. При цьому допустима похибка: від 922 °C до 960 °C. Середня температура в камерах змодельованих установок перебуває в обов'язкових межах, як і температура термопары (рис. 2.9).

У камері вогневих печей існує суттєвий перепад температур по вертикалі, менший у горизонтальному напрямку (рис. 2.9, рис. 2.10). Це можна пояснити базовими фізичними законами конвективного перенесення тепла [7].

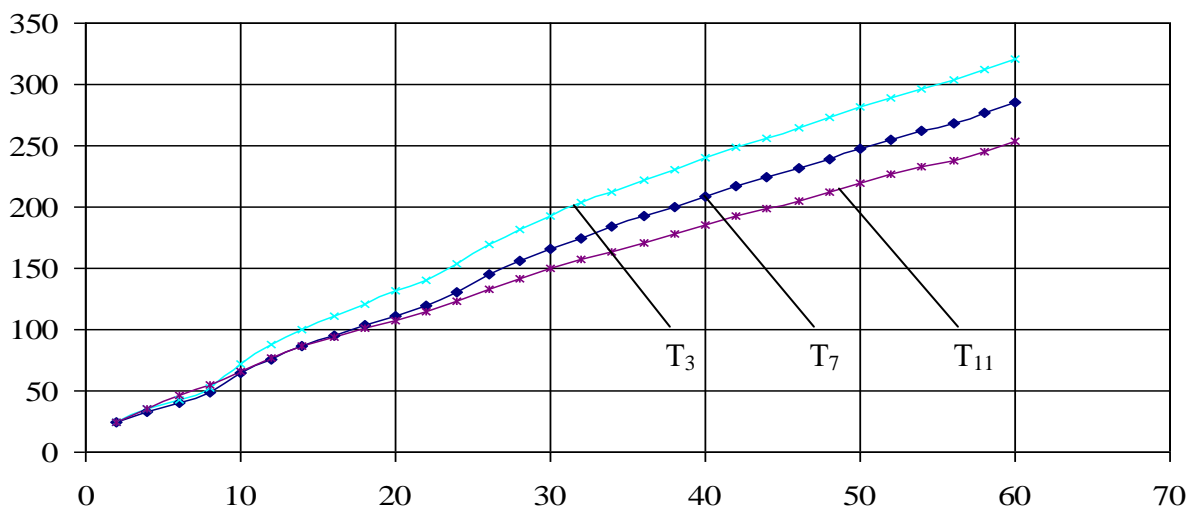


Рис. 2.12 – Графік зміни температури в приарматурному шарі вертикальної конструкції при моделюванні випробувань у печі Лаб. 1:  $T_3$ ,  $T_7$ ,  $T_{11}$  – показники температури в різних частинах конструкції (рис. 7)



Отримані результати моделювання випробувань вертикальних будівельних конструкцій засвідчують, що не всі показники температур, контрольовані в камері, не перевищили допустиму похибку випробувань. Різниця температур наприкінці розрахунку в різних частинах камери печі становить 140 °С для Лаб. 1 та 156 °С для Лаб. 2. Необхідно зазначити, що температура 945 °С у верхній частині камери печі Лаб. 2 була досягнута вже на 40-й хвилині випробувань. Навіть якщо врахувати похибку математичного моделювання за допомогою комп'ютерної програми, то результат залишається суттєвим.

Під час обчислювального експерименту досліджено інертність термопар. Для цього в камері змодельованих установок, поряд із моделлю термопар на відстані 50 мм, організовано контроль температури. Зіставлено результати показників термопар та дійсної температури.

У камерах печей температура безпосередньо поряд із термопарою відрізняється від значень термопар ( $\Delta T_{п1} \approx 13^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{п2} \approx 14^\circ\text{C}$ ). Отже, якщо врахувати похибку термопар (а це  $\leq 15^\circ\text{C}$  [1]), то сумарна похибка може становити 27 – 30 °С. Оскільки випробування проходять протягом тривалого часу, це позначається на достовірності й точності отриманих результатів.

Температура в приарматурному шарі залізобетонних конструкцій вогневих печей на 60-й хвилині досліду була розподілена нерівномірно (табл. 2.7). Різниця температур дорівнює 31 °С для Лаб. 1 та 129 °С для Лаб. 2. Температура 226 °С у верхній частині приарматурного шару конструкції, що досліджувалась у Лаб. 2, була досягнута на 43-й хвилині випробувань, а в середній частині камери – на 53-й.

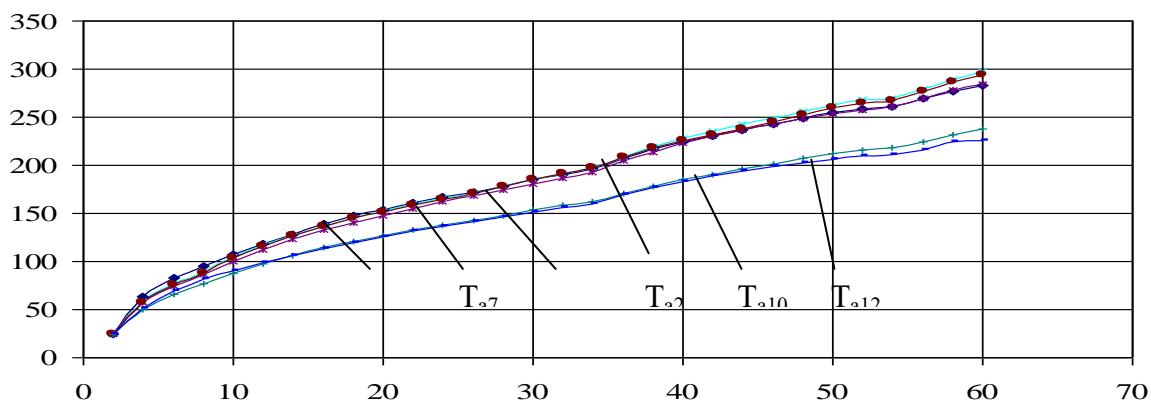


Рис. 2.13 – Графік зміни температури в приарматурному шарі вертикальної конструкції при моделюванні випробувань у печі Лаб. 2:  $T_a$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{a7}$ ,  $T_{a10}$ ,  $T_{a12}$ , – показники температури в різних частинах конструкції (рис. 8)

Таблиця 2.7

**Температура (на відстані 100 мм від стіни) за результатами експериментів у різних місцях камер вертикальних випробувальних печей**

Розміщення контрольної точка	Відповідно до [1].	Лаб. 1	Лаб. 2
На 60-й хвилині випробувань:			
Всередині змодельованої термопари	від 922 °С до 969 °С	≈ 937 °С	≈ 942 °С
Безпосередньо поруч з термопарами		≈ 924 °С	≈ 928 °С
У верхній частині камер печей		≈ 968 °С	≈ 1057 °С
У нижній частині камер печей		≈ 828 °С	≈ 851 °С
На 30-й хвилині випробувань:			
Всередині змодельованої термопари	від 800 °С до 884 °С	≈ 860 °С	≈ 837 °С
Безпосередньо поруч з термопарами		≈ 844 °С	≈ 839 °С
У верхній частині камер		≈ 914 °С	≈ 968 °С
У нижній частині камер		≈ 757 °С	≈ 735 °С

Таблиця 2.8

**Температура (на рівні арматури) за результатами обчислювальних експериментів у різних місцях камер вертикальних випробувальних печей**

Розміщення контрольної точки	Відповідно до [8]	Лаб. 1	Лаб. 2
На 60-й хвилині випробувань:			
Безпосередньо поруч з термопарами	<500 °С	≈ 285 °С	≈ 283 °С
У верхній частині камер		≈ 284 °С	≈ 297 °С
У нижній частині камер		≈ 253 °С	≈ 226 °С
На 30-й хвилині випробувань:			
Безпосередньо поруч з термопарами	<500 °С	≈ 165 °С	≈ 184 °С
У верхній частині камер		≈ 149 °С	≈ 185 °С
У нижній частині камер		≈ 193 °С	≈ 151 °С

За допомогою засобів комп'ютерної газодинаміки використаного програмного комплексу було розглянуто розподіл температур на обігрівальній поверхні залізобетонних конструкцій під час випробувань на вогнестійкість. Поверхня стін нерівномірно прогривається протягом усього часу випробувань. Градієнт температур є суттєвим, а це не може не впливати на результати випробувань.

У ході наступного етапу досліджень проаналізовано розподіл температур на обігрівальній поверхні залізобетонних конструкцій (рис. 2.14, рис. 2.15). Градієнт температур по поверхні плити є суттєвим, це не може не впливати на результати випробувань.

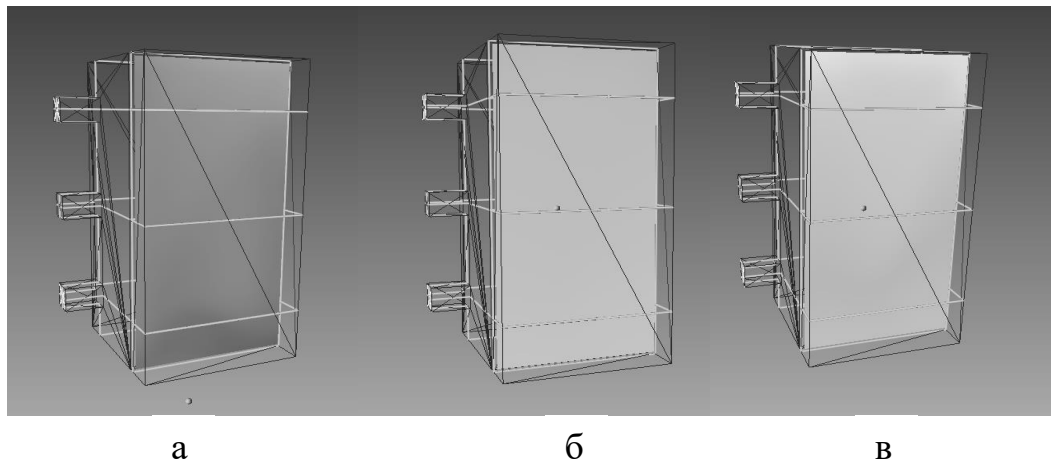


Рис. 2.14 – Розподіл температур на обігрівальній поверхні плити: а – 10-та хвилина випробувань; б – 30-та хвилина випробувань; в – 60-та хвилина випробувань.

Як можна побачити з рис. 2.14, рис. 2.15, обігрівальна поверхня залізобетонних конструкцій нерівномірно прогривається протягом усього часу випробувань.

Аналіз попередніх розрахунків спонукає до висновку про те, що вдосконалення установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій належить до актуальних питань, оскільки в наявних вогневих печах установки істотно відрізняються геометричною конфігурацією, видом паливно-форсункової системи, схемами розташування й конструкцією вимірювальної арматури. Це потенційно призведе до того, що випробувальні установки даватимуть результати, які відрізняються на 30 % і більше. У такому разі не можна гарантувати відповідність меж вогнестійкості випробувальних конструкцій чинним нормативам. За цих умов суттєво знижується рівень безпеки людей і матеріальних цінностей у будівлях та спорудах.

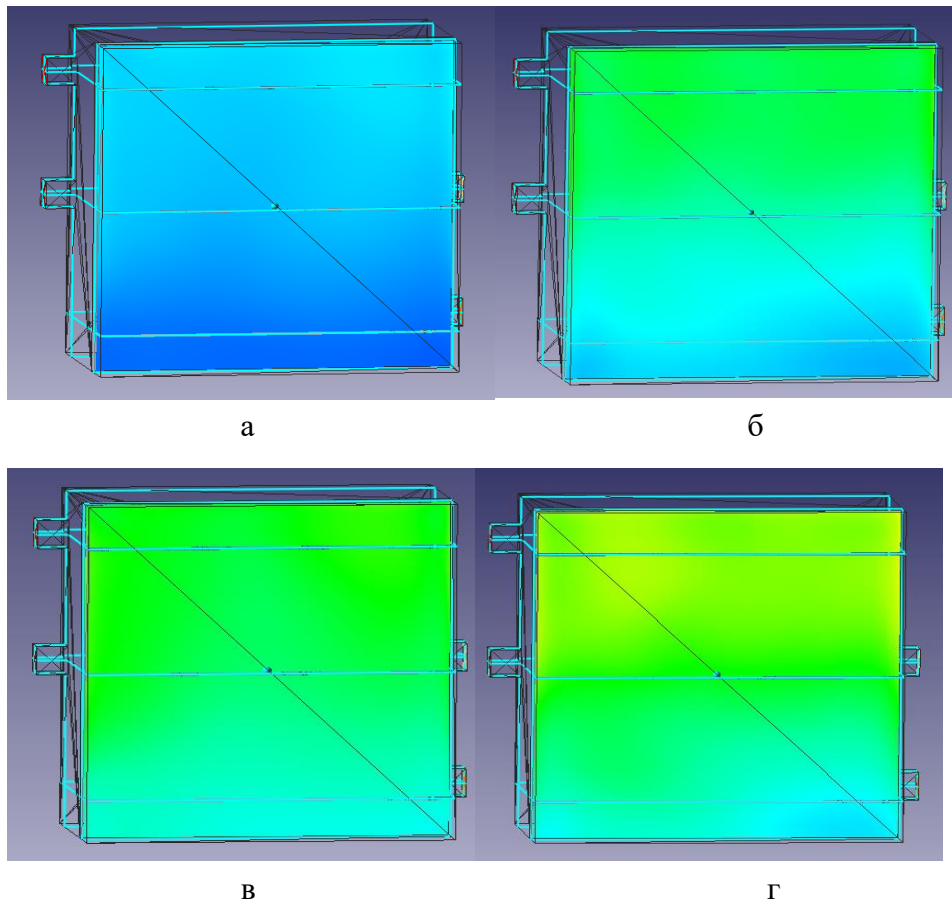


Рис. 2.15 – Розподіл температур на обігрівній поверхні плити: а – 10-та хвилина випробувань; б – 30-та хвилина випробувань; в – 60-та хвилина випробувань.

У ході виконання пошуку доведено, що для уникнення дорогих випробувань із порушеного питання доцільно проводити дослідження на основі результатів обчислювальних експериментів. Сучасне програмне забезпечення з моделювання теплових процесів засобами комп'ютерної газодинаміки («CFD») дає змогу врахувати всі необхідні параметри аналізованих процесів і вивчити вплив геометричних та конструктивних характеристик печі для випробувань залізобетонних конструкцій на якість отримуваних даних.


Для з'ясування того, наскільки коректно модель описує реальні процеси, що відбуваються в системі, наскільки якісно вона прогнозує розвиток процесів, необхідно отримати кількісні показники адекватності побудованої моделі. Перевірку адекватності варто проводити на підставі експериментальної інформації, одержаної внаслідок вогневих випробувань фрагмента будівельної конструкції [55].

## 2.4. Статистичне оброблення результатів вогневих випробувань та обчислювальних експериментів із їх моделювання

Унаслідок всебічного опрацювання літературних джерел [29–32; 55–57], підсумовано, що для статистичного оброблення й порівняння результатів випробувань лабораторій найбільш доцільно застосовувати критерії Кохрена, Граббса (Смирнова), Фішера та Стьюдента (табл. 2.9).

Таблиця 2.9

### Статистичні критерії адекватності

Назва	Сфера застосування	Основні формули для розрахунків
2	3	4
Критерій Кохрена	Виявлення в результатах випробувань викидів (квазівикидів) [55].	$C = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p S_i^2},$ $S_{\max}$ – найбільше середньо квадратичне відхилення результатів випробувань з усіх лабораторій.
Критерій Граббса (Смирнова)	Перевірка із застосуванням критерію Кохрена становить сумніви щодо високої внутрішньолабораторної варіації результатів випробувань [55].	$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}_j}{S_j}, \quad G_{\min} = \frac{\bar{y}_j - y_{\min}}{S_j}$ $\bar{y}_j$ – середнє значення; $S_j$ – оцінка середньоквадратичного відхилення.
Критерій Фішера	Порівняння дисперсій результатів випробувань лабораторій [55; 56].	$\frac{S_1^2}{S_2^2} = F$ , $S_1^2$ – оцінки дисперсій першої та другої лабораторії.
Критерій Стьюдента	Для порівняння результатів випробувань двох лабораторій [55; 56].	 $t' = \frac{ \bar{y}_1 - \bar{y}_2 }{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$ <p><math>n</math> – кількість випробувань;  <math>\bar{y}_j</math> – середнє значення;  <math>S_j</math> – оцінка середнього квадратичного відхилення</p>

Відповідно до [12] для виявлення в результатах випробувань викидів (квазівикидів) застосовують статистичні критерії Граббса та Кохрена. Критерій Граббса може бути використаний у випадках, коли перевірка із застосуванням критерію Кохрена породжує сумніви щодо високої внутрішньолабораторної варіації результатів випробувань.

Після перевірки результатів випробувань на однорідність переходять до їх порівняння. Для зіставлення дисперсій результатів випробувань лабораторій застосовують критерій Фішера [55–57].

Також для порівняння результатів випробувань двох лабораторій можна оперувати критерієм Стьюдента [55–57], що доцільно застосовувати, коли кількість результатів випробувань у кожній лабораторії перебуває в межах від 2 до 30.

Кожен із проаналізованих статистичних методів має низку умов щодо застосування. Зважаючи на специфіку проведення випробувань у галузі пожежної безпеки (застосування руйнівних методів контролю, мала кількість зразків тощо), необхідно оцінювати ступінь їхньої придатності.

Важливий чинник впливу на результат випробувань – однорідність випробовуваних зразків, що набуває особливої актуальності в ході застосування методів руйнівного контролю у сфері пожежної безпеки під час проведення порівняльних випробувань. Однорідність зразків можна оцінювати шляхом контролю їхніх параметрів, але в нормативних документах відсутні критерії оцінювання однорідності зразків [12].

Основне призначення стандартних зразків у галузі метрології полягає в проведенні метрологічної атестації випробувального обладнання чи засобів виміральної техніки або в їх калібруванні.

Відповідно до нормативних документів щодо організації та проведення вогневих випробувань [58–65], для оцінювання результатів запропоновано застосовувати такі статистичні характеристики:

– «різниця» та «процентна різниця», які розраховують за виразами:

$$x_i - X \text{ та} \quad (2.1),$$

$$\frac{x_i - X}{X} \cdot 100\% \quad (2.2),$$

– «показник Z», що розраховують за виразом:

$$Z = \frac{x_i - X}{S} \quad (2.3),$$

де  $x_i$  – результат  $i$ -го учасника;  $X$  – приписане значення;  $S$  – приписане значення оцінки середньоквадратичного відхилення.

Якщо  $Z \leq 2$ , то результати міжлабораторних порівняльних випробувань є задовільними,  $2 < Z < 3$  – сумнівними,  $Z \geq 3$  – незадовільними.

– «число  $E$ » (зазвичай використовують у схемах порівняння вимірювань):

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (2.4),$$

де  $U_{lab}$  – невизначеність результату учасника;  $U_{ref}$  – невизначеність приписаного значення базової лабораторії.

Якщо  $E_n \leq 1$ , то результати випробувань необхідно вважати задовільними. Якщо  $E_n > 1$ , то результати випробувань є незадовільними [12].

### РОЗДІЛ 3

## АДЕКВАТНІСТЬ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

### 3.1. Експериментальне випробування на вогнестійкість несучої залізобетонної стіни

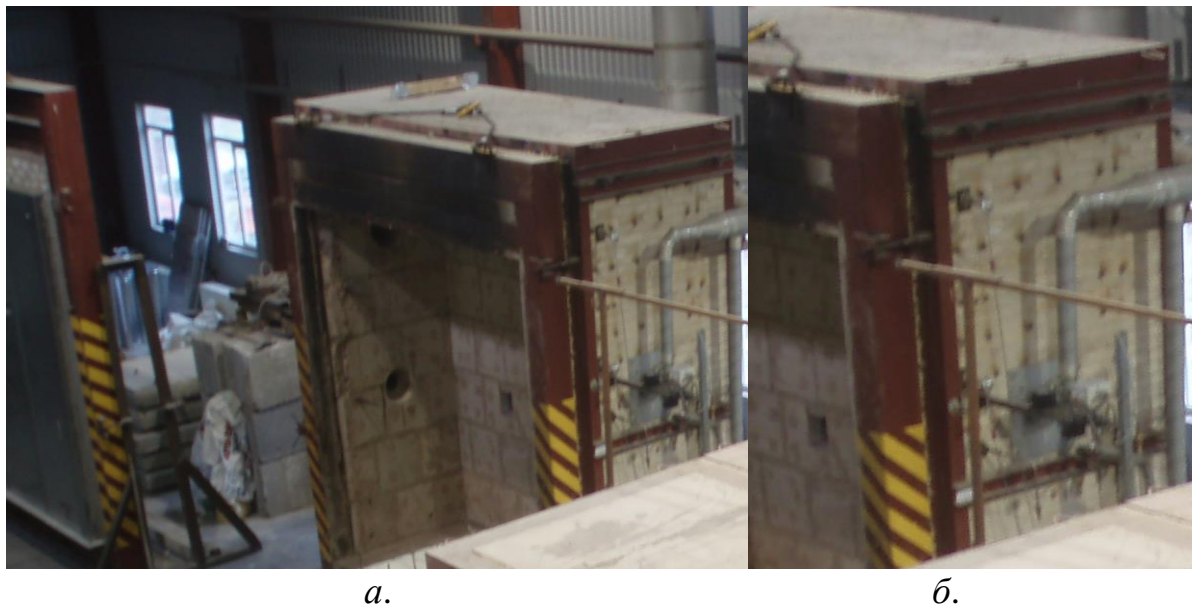


Рис. 3.1 – Загальний вигляд установки для випробувань: а – загальний; б – форсункова система



Рис.3.2 – Зовнішній вигляд зразка до випробування

Перед випробуваннями, згідно з [1 - ДСТУ Б В.1.1-4-98\*], зразок був поміщений в приміщення для кондиціонування зразків ПКЗ-2 та витриманий загальним терміном 7 діб за температури навколишнього середовища  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm$

4°C та вологості  $55\% \pm 2\%$ . Опорна конструкція закріплюється в передній стіні печі за допомогою спеціальних затискачів.

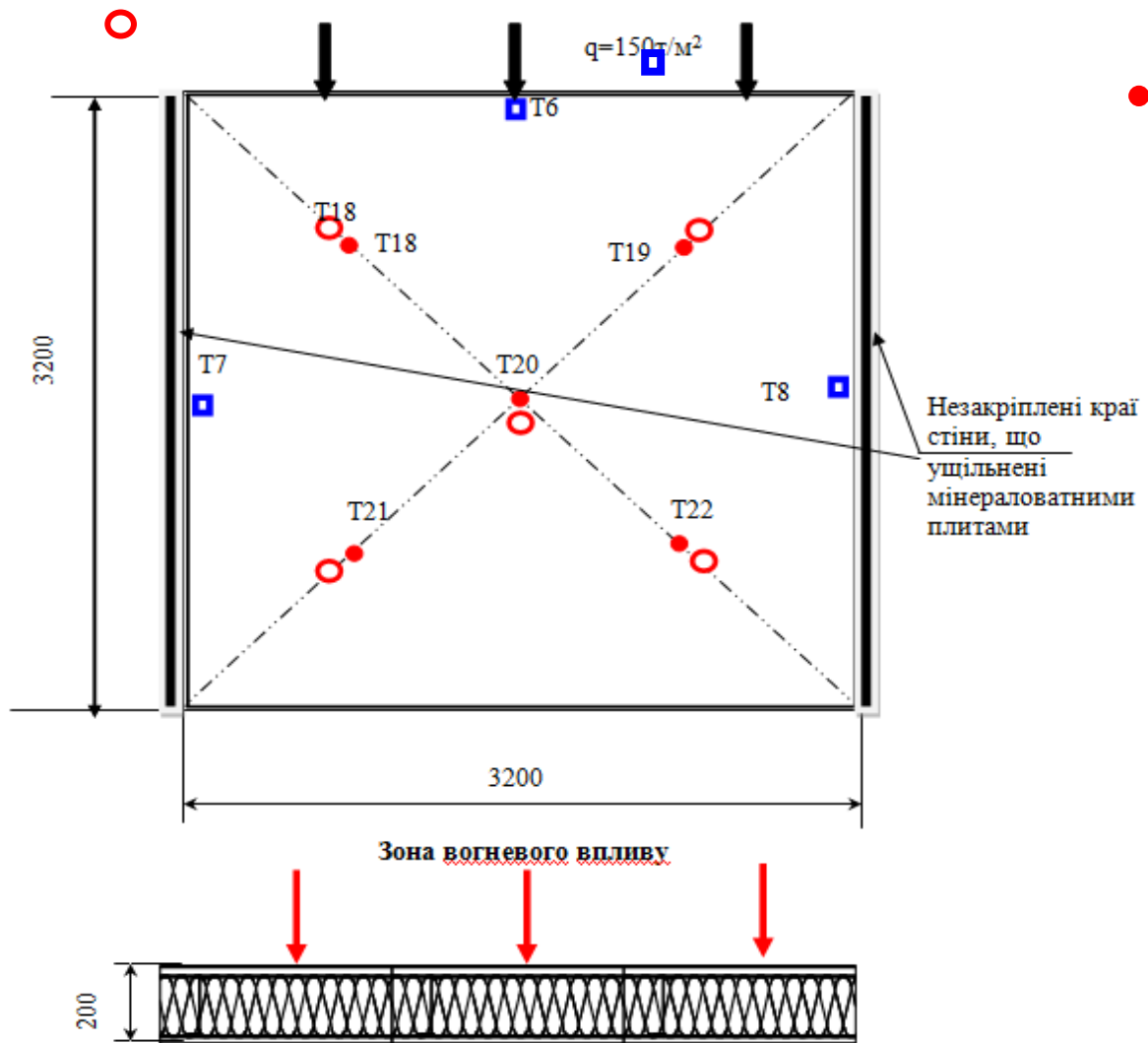


Рис. 3.3 – Схема розташування термопар на необігрівальній поверхні зразків: – термопари для вимірювання середньої та максимальної температури поверхні зразка (Т1-Т5). – додаткові термопари для вимірювання максимальної температури поверхні зразка (Т6 – Т8). – термопари для вимірювання температури на арматурі, що найближча до обігрівальної поверхні зразка (Т26-Т30)

В процесі підготовки до випробувань, згідно з [2 – ДСТУ Б В 1.1-19:2007], на поверхні зразка, що протилежна вогневому впливу (далі – необігрівальній поверхні), були встановлені термоелектричні перетворювачі (термопари) Т18 – Т22 для вимірювання середньої та максимальної температури.



Таблиця 3.1

## Засоби вимірювальної техніки

№ п/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1	Лінійка вимірювальна (інв.№4)	-	від 0 до 1000 мм	± 1 мм
2	Секундомір СОСпр-26-2-010 (інв.№13)	3187	від 0 до 60 хв.	Середній клас точності
3	Система контролю температури "СКОРАД" на основі блоків Вега-5 (інв.№26)	-	від -5 до 1300 °С	Границі допустимої похибки вимірювання ± 1,5 °С
4	Термопары ТХА, 14 одиниць (інв.07-020)	-	від 0 до 1100 °С	Клас 2
5	Термопары N (1100мм), 6 одиниць (інв.№047-052)	-	від 0 до 1200 °С	Клас 2
6	Термогігрометр АРТ-06917 (інв.№2)	1045	від 25 до 90 % від 0 до 50 °С	± 5 % ± 1,0 °С
7	Штангенциркуль ЩЦ-Па (інв.№11)	0711110	від 0 до 300 мм	± 0,05 мм
8	Мановакуумметр цифровий ММЦ-200 (інв.№5)	20	від 0 до +200 Па	± 0,5 %
9	Сушильна шафа	Б/н	від 20 до 100 °С	± 2,5 °С
10	Ваги електронні ULTRA (інв.№7)	021	від 0 до 200 г	± 0,1 г
11	Щупи діаметром: 6мм (інв.№9) 25мм (інв.№10)	Б/н Б/н	6 мм 25 мм	± 0,1 мм ± 0,1 мм
12	Віддалемір лазерний ручний Disto D3a BT (інв.№18)	9028306 00	від 0,05 до 100м	± 1 мм
13	Віддалемір лазерний ручний Disto D3a BT (інв.№17)	9108300 12	від 0,05 до 100м	± 1 мм

Таблиця 3.2

**Основні параметри залізобетонних стін-зразків для випробувань**

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
• ширина	$s$	0,2	м
• ширина захисного шару	$w$	0,02	
• довжина стіни	$l$	3,2	
• висота стіни	$h$	3	
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 30/35 (В30)	
Густина бетону	$\rho_B$	2300	кг/м <sup>3</sup>
Водоцементне відношення	В/Ц	0,36	
Гранична вологість	$u$	< 3	%
Робоча арматура внутрішня:		Клас А500С	
• діаметр	$d_1$	0,016	м
Робоча арматура зовнішня:		Клас А240С	
• діаметр	$d_2$	0,016	м
Каркасна арматура:		Клас А240С	
• діаметр	$d_3$	0,008	м

Таблиця 3.3

**Технічні характеристики компонентів залізобетонних стін-зразків для випробувань**

Найменування	Клас	Властивості	Параметри
Бетон важкий	С 30/35 (В30)	рядовий, гідротехнічний	Кубікова міцність – не менше за 30 МПа
Арматура $d_3 = 8$ мм	А240С	арматурна сталь	Крок – 200мм; площа поперечного перерізу 0,503 Міцність – 240 МПа
Арматура $d_2 = 16$ мм	А240С	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь	Крок – 200мм; площа поперечного перерізу 0,503 Міцність – 240 МПа
Арматура $d_1 = 16$ мм	А500С	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь	Крок – 200мм; площа поперечного перерізу 0,503 Міцність – 500 МПа

На зразках встановлено додаткові термоелектричні перетворювачі (термопари) Т23 – Т25 для вимірювання максимальної температури.

На арматурі, що ближча до поверхні, зі сторони вогневого впливу встановлені термоелектричні перетворювачі Т26 – Т30. Термопари заведені зі сторони поверхні зразка, що протилежна вогневому через сталеві трубки.

Схему розташування термопар на зразку наведено на рис. 3.3.

Для випробувань використовувалась вогнева піч ВП-1 з навантажувальною рамою, інв. №20 (Атестат № 24-2/5983), приміщення для кондиціонування зразків ПКЗ-2, інв. №16 (Атестат № 24-2/0442) і засоби вимірювальної техніки, які наведено в табл. 3.1.

Проведення випробувань фрагментів стін-зразків здійснювалося за методом, що регламентований [1]. Метод випробувань полягає у визначенні проміжку часу від початку випробування за температурним режимом згідно з [1] за вогневого впливу з обігрівної сторони фрагменту стіни-зразка [1].

Межа вогнестійкості конструкції визначається за формулою [1]:

$$t_{fr} = t_{mes} - \Delta t \quad (3.1),$$

де:  $t_{fr}$  – межа вогнестійкості конструкції, хв.,  $t_{mes}$  – значення часу від початку випробувань до досягнення граничного стану з вогнестійкості,  $\Delta t$  – похибка випробування.

Похибку випробувань визначають таким чином:

Для інтервалу часу від 0 до  $t_{mes}$  визначають інтегральне значення  $A_f$  середньої температури  $T_f$  в печі під час випробування за такою формулою:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{fi} + T_{fi-1}) (t_i - t_{i-1}) \quad (3.2),$$

де:  $T_{fi}$  – значення середньої температури в печі, що відповідає часу  $t_i$ , °С;  $t_i$  – час  $i$ -го циклу вимірювання середньої температури.,  $i$  – номер циклу вимірювання середньої температури (дорівнює часу  $t_i$ , якщо вимірювання проводять через 1 хв),  $n$  – номер циклу вимірювання, для якого  $t_i = t_{mes}$

Таким же чином для інтервалу часу від 0 до  $t_{mes}$  визначають інтегральне значення  $A_s$  стандартної температури  $T_s$  за формулою:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{si} + T_{si-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.3)$$

де:  $T_{si}$  – значення стандартної температури, що відповідає часу  $t_i$ , °С.

Формулу для розрахунку значень температури  $T_s$  залежно від часу наведено в [22].

- Якщо  $A_f \geq A_s$ , то  $t=0$ .
- Якщо  $A_f < A_s$ , то похибку  $\Delta t$  визначають за формулою:

$$\Delta t = (0,015 t_{\text{мес}} + 3) (A_s - A_f) / (A_s - A_{\text{min}}) \quad (3.4),$$

де :  $A_{\text{min}}$  – інтегральне значення мінімально допустимої температури  $T_{\text{min}}$  для інтервалу часу від 0 до  $t_{\text{мес}}$ , °С· хв.

Значення  $A_{\text{min}}$  визначають за формулою, аналогічною формулам (3.2) і (3.3):

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{\text{mini}} + T_{\text{mini-1}}) (t_i - t_{i-1}) \quad (3.5),$$

де :  $T_{\text{mini}}$  – значення мінімально допустимої температури  $T_{\text{min}}$ , що відповідає часу  $t_i$ , °С.

Температуру  $T_{\text{min}}$  визначають за формулою:

$$T_{\text{min}} = T (1 - |0,01d|) \quad (3.6),$$

де :  $d$  – допустиме відхилення середньої температури в печі від температури  $T_s$ , %.

Межа вогнестійкості визначається за результатами міцнісного розрахунку.

Залежності для визначення відхилення наведені в [22]. Для випробувань було використано два зразки-близнюки фрагментів стін.

Вертикальні деформації зразків визначалися в двох точках по одній з кожного краю зразка. Також додатково вимірювались всі суттєві горизонтальні деформації (такі, що перевищують 5мм) в центрі зразка та посередині висоти вертикального краю зразка на відстані 50 мм від краю.

Випробування припиняються у випадку досягнення одного з граничних станів. Настання граничного стану визначаються згідно з вимогами стандартів [22, 23], і які описані у п. 1.2.6 дійсної роботи. Для визначення критичних значень вертикальних переміщень використані формули (1.2) і (1.3). Згідно з розрахунками отримані такі значення: поздовжнє зміщення навантаженого кінця зразка складає 32 мм, граничне значення швидкості наростання вертикальної деформації – 9,6 мм/хв.

Результати випробувань наведено на рис. 3.4 – рис. 3.9.

Надлишковий тиск у печі на висоті, яка дорівнює  $\frac{3}{4}$  висоти зразків, через 5 хв. після початку випробувань та протягом випробувань складав  $(10 \pm 3)$  Па.

Для оцінки цілісності зразка використовувався пристрій на основі ватного тампону згідно з [1 - ДСТУ Б В.1.1-4-98\*].

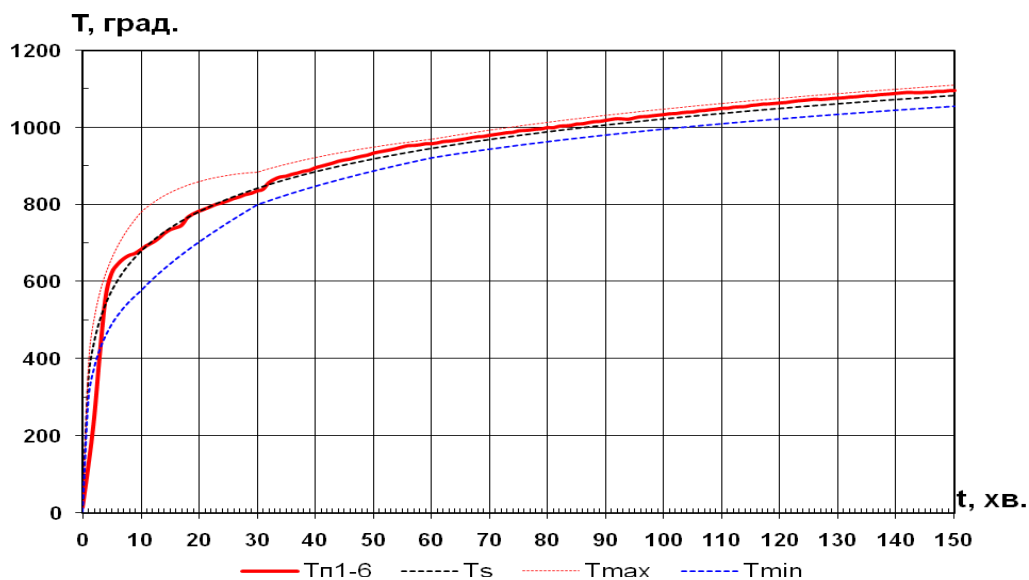


Рис.3.4 – Температурний режим в печі під час випробування зразка

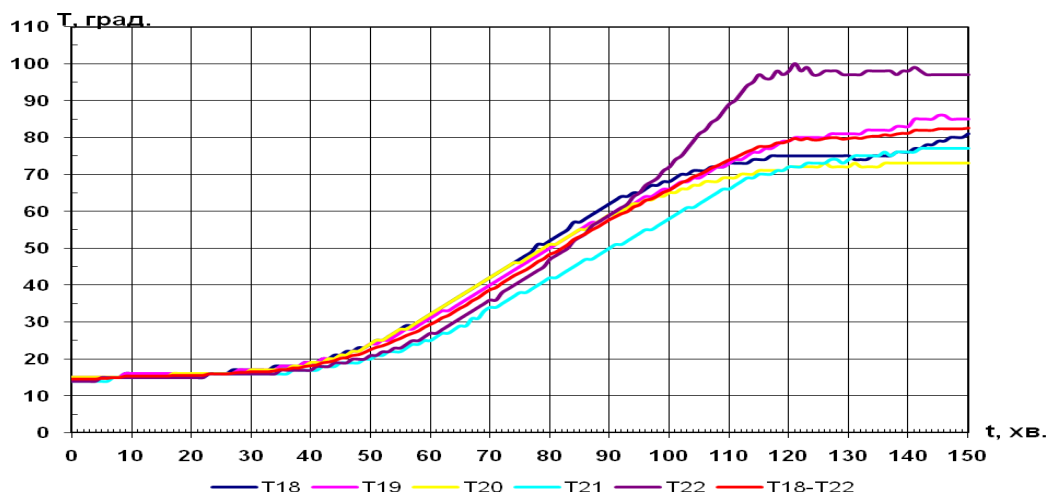


Рис. 3.5 – Залежності температури від часу на необігрівальній поверхні зразка

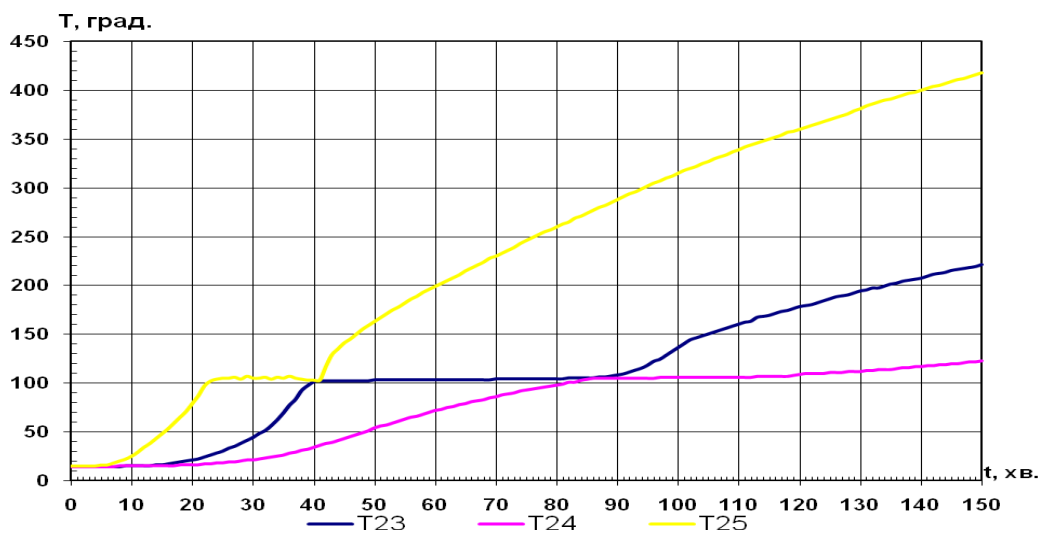


Рис. 3.6 – Залежності температури від часу на необігрівальній поверхні зразка

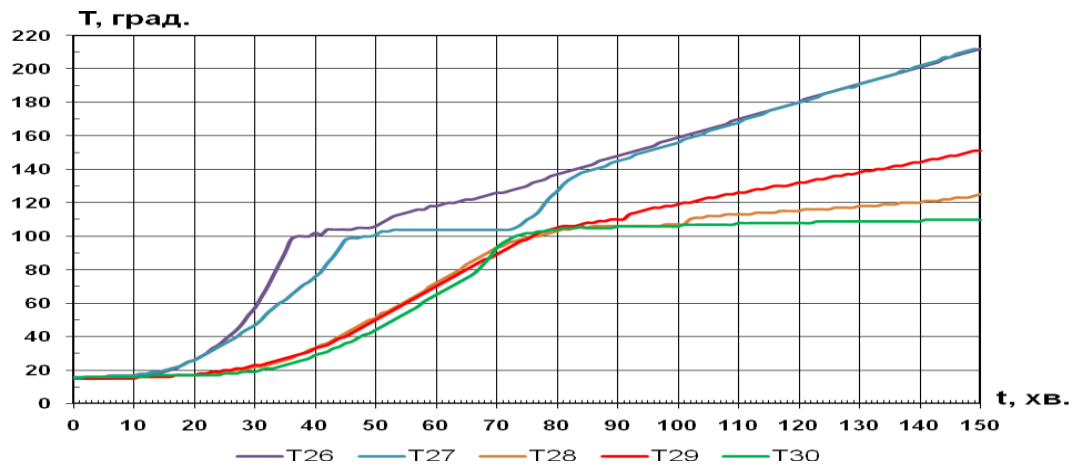


Рис. 3.7 – Залежності вертикальної деформації зразка від часу

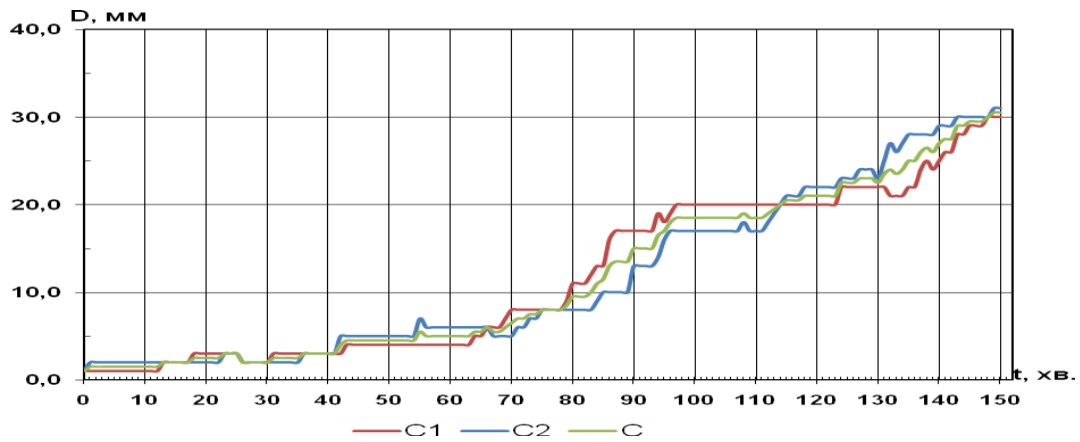


Рис. 3.8 – Залежність поздовжнього зміщення навантаженого кінця зразка від часу зразка

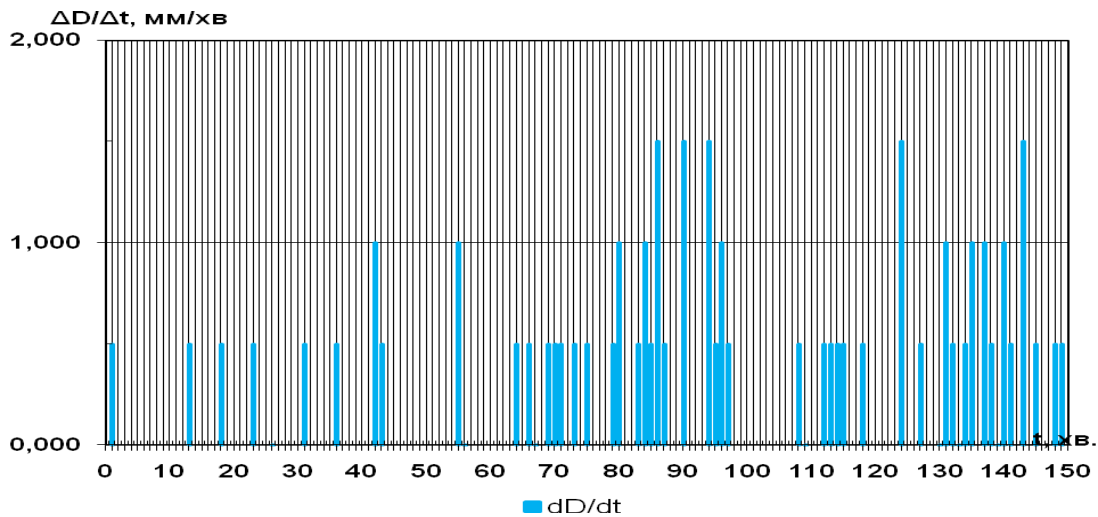


Рис. 3.9 – Залежність швидкості наростання вертикальних деформацій зразка від часу

За час випробування зразка, який дорівнює 150 хв настання граничних станів за ознаками втрати: несучої здатності (R), цілісності (E) та теплоізолювальної здатності (I) не відбулося. Суттєвих поздовжніх переміщень навантаженого кінця не відбулося. Максимальна температура виміряна на арматурі зразка, найближчої до обігрівальної поверхні, складала 213 °С.

Випробування тривали 150 хв згідно з договором.

Згідно з формулою (3.2) інтегральне значення  $A_f$  середньої температури  $T_f$  становить для часу випробувань, що дорівнює 150 хв – 141091 °С·хв.

Згідно з формулою (3.3) інтегральне значення  $A_s$  стандартної температури  $T_s$  становить для часу випробувань, що дорівнює 150 хв – 139880 °С·хв.

Згідно з формулою (3.5) інтегральне значення  $A_{min}$  мінімально допустимої температури  $T_{min}$  становить для часу випробувань, що дорівнює 150 хв – 134400°С·хв.

Так як  $A_f > A_s$ , то похибка  $\Delta t=0$

Зовнішній вигляд зразка після випробування подано на рис. 3.10.



Рис. 3. 10 – Зовнішній вигляд зразка після завершення випробувань

Час настання граничного стану з вогнестійкості зразка за ознаками втрати: несучої здатності (R), цілісності (E) та теплоізолювальної здатності (I) відповідно до формули (1) становить не менше, ніж сто п'ятдесят хвилин.

### 3.2. Геометричні особливості комп'ютерної конфігурації камери вертикальної випробувальної установки

У Розділі 2 були показані переваги використання методів обчислювальної газогідродинаміки (CFD) для наукових досліджень у сфері моделювання випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. У вище згаданому розділі були описані можливості застосування одного з програмних комплексів CFD FlowVision 2.5, компанії ТОВ «Тесис». Використовуючи описаний алгоритм, була створена геометрична і математична моделі горизонтальної вогневої печі, на якій проводилися випробування.

При моделюванні випробувань використовувалася геометрична конфігурація печі, що як найбільш точно відтворює параметри камери реальної установки (рис. 2.2). Температура контролювалася в 6-ти точках камери печі, на відстані 100 мм від досліджуваного зразка. Координати місць контролю температури збігаються з координатами розміщення термопар 1-6 (рис. 3.11) у камері реальної установки. Контроль температури відбувався так, щоб середня температура в камері печі, по можливості, точно збігалася з температурною стандартної кривої пожежі і не виходила за допустимі межі випробування [1]. Додатково в камері змодельованої установки передбачається модель термопар, у вигляді стрижня діаметром 6 мм і довжиною 100 мм, для дослідження інертності роботи термопар печі.

На рис. 2.2 показана геометрична конфігурація вогневої печі, описаної в розділі 3.1. Дана геометрична модель буде використовуватись для відтворення процесу випробувань у комп'ютерній програмі та верифікації даних експериментів.

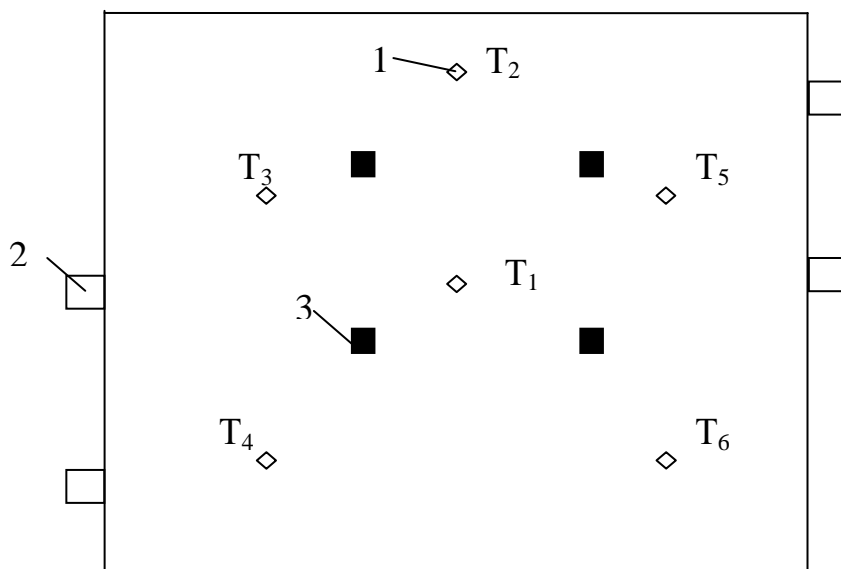


Рисунок 3.11 – Схема розміщення термопар для контролю температурного режиму в камері печі:  $T_1$ – $T_6$ -термопар; 1 – розташування отворів для відводів продуктів горіння; 2 – пальник, 3 – отвір для виходу продуктів горіння



Тепловий процес являє собою згоряння розпилених форсункою частинок гасу в нагрівальних каналах (рис. 2.1) і частково в камері печі. Розташування каналів обумовлює циркуляцію гарячого повітря з продуктами згоряння в камері печі і видалення останніх через димовий люк.

Під час проведення обчислювального експерименту контроль температури відбувався так, щоб середня температура в камері змодельованої печі по можливості точно співпадала з температурною стандартною кривою пожежі і не виходила за допустимі межі випробування [1]. Для цього засобами контролю системи FlowVision 2.5 в інтерактивному режимі знімалися поточні дані з місць заміру температури, і, при досягненні максимальної температури для певного кроку за часом, параметри процесу горіння змінювалися.

### 3.3. Перевірка адекватності математичної моделі горизонтальної вогневої печі, побудованої на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса

Перевірка адекватності проводиться на підставі інформації, отриманої за результатами реального експерименту (розділ 3.1) та комп'ютерного моделювання випробувань у аналогічній геометричній конфігурації вогневої печі.

Аналіз графіків (рис. 3.12, рис. 3.13) доводить, що найбільші взаємні відхилення кривих, побудованих за даними випробувань і результатами моделювання, виникають на початкових етапах випробувань, у межах 10-20 хв. При цьому на графіках продемонстровано, що відхилення результатів розрахунку від результатів експериментів несуттєве, що засвідчує високу ефективність комп'ютерного моделювання.

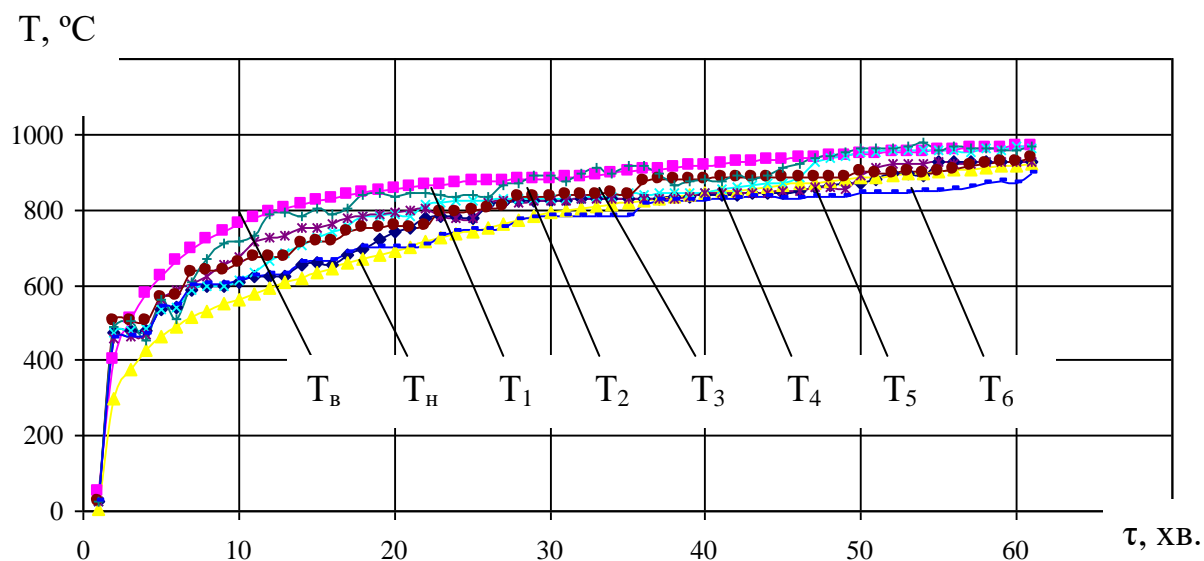


Рис. 3.12 – Температурні криві нагріву простору камери змодельованої печі:  $T_{1-6}$  – температури, в місцях розміщення термопар, з відповідним номером;  $T_{B,H}$  – граничні криві відхилень показників термопар від стандартної температурної кривої пожежі [1]

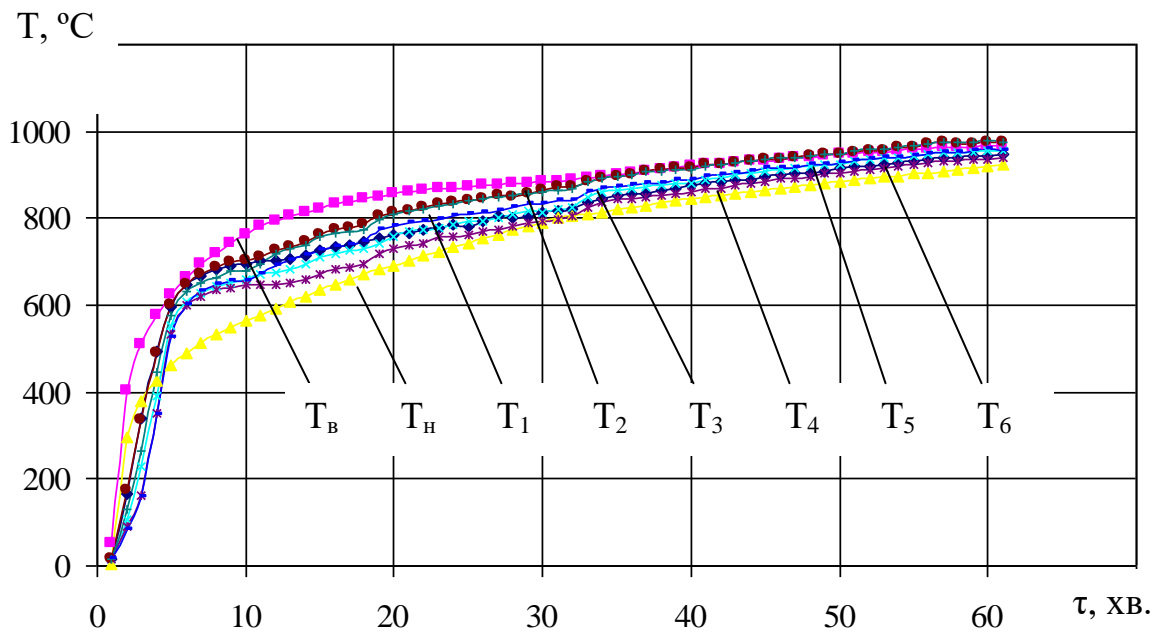


Рис. 3.13 – Температурні криві нагріву простору камери печі згідно з протоколом випробувань:  $T_{1-6}$  – температури термопар;  $T_{B,H}$  – граничні криві відхилень показників термопар від стандартної температурної кривої пожежі [1]

Для з'ясування того, наскільки добре модель описує реальні процеси, що відбуваються в системі, наскільки якісно прогнозує розвиток процесів, необхідно отримати кількісні показники щодо адекватності побудованої моделі. Перевірка адекватності виконана на підставі експериментальної інформації, отриманої внаслідок вогневих випробувань фрагмента будівельної конструкції.

У нашому випадку, був проведений реальний експеримент з визначення межі вогнестійкості залізобетонної несучої стіни в результаті вогневих випробувань за стандартною температурною кривою пожежі одного з випробувальних центрів (розділ 3.1) і отримані результати обчислювального експерименту, проведеного з використанням отриманої математичної моделі вогневої печі (розділ 3.2).

Для перевірки адекватності результатів моделювання обрано декілька критеріїв адекватності, що схарактеризовані нижче.

F-критерій Фішера застосовують для послідовного порівняння дисперсій температури в камері змодельованої установки з дисперсією експериментальних досліджень. За допомогою критерію Фішера можливо перевірити гіпотезу про рівність генеральних дисперсій, розподілу температур на кожній хвилині випробувань:

$$F = \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \quad (3.7),$$

де  $S_{xy}^2$  – дисперсія адекватності,  $S_y^2$  – дисперсія відтворюваності.

Дисперсія адекватності розрахована як відхилення між розрахунковими й експериментальними даними в кожній із термопар експериментальної установки та відповідного їй місця замірювання температури в моделі.

У створеній моделі – 6 місць замірювання температури, під час експерименту термопар – 6. Дані кожної з термопар розрахунку порівняні почергово з термопарами експерименту. Так отримано 6 значень дисперсії адекватності.

$$S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n} \quad (3.8),$$

де  $n$  – кількість замірів температури,  $y_i$  – значення критерію в ході моделювання,  $x_i$  – значення критерію під час випробування.

Дисперсія відтворюваності розрахована як відхилення розрахункової температури простору безпосередньо біля змодельованої термопари й показників змодельованої термопари, з урахуванням експериментальної похибки [1].

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y} + 15)^2 \quad (3.9),$$

де  $n$  – кількість замірів температури,  $\bar{y} + 15$  – показники змодельованої термопари з урахуванням експериментальної похибки [1],  $y_i$  – показники термопари безпосередньо біля змодельованої термопари.

Отже, по черзі 6 значень дисперсії адекватності порівняно з дисперсією відтворюваності й розраховано критерій Фішера (F).

t-критерій Стьюдента застосовують для порівняння результатів реального та обчислювального експериментів:

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (3.10),$$

$$\bar{y}_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.11),$$

де  $S_1^2$ ,  $S_2^2$  – оцінки дисперсій випробування в лабораторії та обчислювального експерименту, обчислені аналогічно до розрахунку критерію Фішера,  $n_{1,2}$  – число ступенів свободи.

Отримано 6 значень критерію (t) у ході розрахунку дисперсії відтворюваності як відхилення розрахункової температури простору безпосередньо біля змодельованої термопари й показників змодельованої термопари, з огляду на експериментальну похибку [1].

Q-критерій Кохрена (визначення викидів і квазівикидів):

$$Q = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p S_i^2}, \quad (3.12),$$

де  $S_{\max}$  – найбільше середньоквадратичне відхилення результатів випробувань.

Q-критерій використовують, порівнюючи три й більше вибірок однакового обсягу. Почергово порівняні дисперсії між експериментальними даними й розрахунковими в місці розташування кожної термопари з 4-ма дисперсіями між симетричними точками в ході експерименту (4 пари термопар щодо поздовжньої осі симетрії). Отримано 8 значень критерію.

Результати розрахунку критеріїв адекватності узагальнено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

**Параметри дисперсії результатів  
математичного моделювання вогневих випробувань  
залізобетонної конструкції від експериментальних даних**

Критерій	Зона термопари (рис. 3.10)							Середнє значення	Критичне значення
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>			
Максимальне відхилення, °C	57,4	64,3	68,9	108,1	47,9	42,8	64,9	-	
Середнє відхилення, °C	24,0	22,4	19,4	25,0	21,8	21,7	22,4	-	
Відносне відхилення, %	5,15	4,81	4,16	5,37	4,67	4,66	4,81	15 [3]	
F-критерій	1,62	3,84	3,49	3,77	1,31	4,03	3,01	4,49 [55]	
t-критерій	1,52	1,77	1,93	1,82	1,18	1,45	1,61	2,92 [55]	
Q-критерій	0,32	0,35	0,39	0,32	0,33	0,32	0,34	0,45 [55]	

## РОЗДІЛ 4

### ОБҐРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОГНЕВОЇ ПЕЧІ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ МІНІМАЛЬНО МОЖЛИВІ ДИСПЕРСІЇ ТЕМПЕРАТУР НА ОБІГРІВАЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ СТІНИ ПІД ЧАС ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

#### 4.1. Теоретичні передумови обчислювального експерименту

Використання вогневих випробувальних установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін є найкращим способом, оскільки вони дають змогу максимальним чином урахувати всі особливості досліджуваного елемента й умови, що виникають під час пожежі. Велика кількість різновидів і типорозмірів печей зумовлена їхньою недосконалістю, можливістю схарактеризувати тільки зразки певних конструкцій і розмірів.

Оскільки випробування у вогневих печах [1, 2] здійснюється в умовах «стандартного» температурного режиму, виникає питання про рівномірність прогріву залізобетонної конструкції в залежності від конструкції та дизайну вогневої печі, так як внутрішня будова камери, розміщення пальників та отворів для відведення продуктів горіння впливає на рівномірність розподілу температури по обігрівальній поверхні вертикальних конструкцій, зокрема несучих стін.

У попередніх розділах даної роботи було описано процес створення комп'ютерної моделі вогневої печі, на якій проводилися реальні випробування, в середовищі програмного комплексу CFD FlowVision 2.5, та проведено обчислювальний експеримент, в ході якого показано ефективність моделювання теплових процесів для подальшого її використання при вивченні впливу конструктивних характеристик вогневих печей на їх метрологічні показники.

Аналіз конструкції та роботи печей для випробувань будівельних конструкцій засвідчив факт недосконалості конструкції, метрологічного забезпечення та методів управління паливно-форсунковою системою. Для їх удосконалення необхідний підхід, заснований на використанні комп'ютерних моделей, тому що проведення випробувань на реальних моделях потребує великої трудомісткості й дуже високої вартості, а також вимагає спеціальних умов, масштабних площ і призводить до забруднення навколишнього середовища. Крім того, випробування будівельних конструкцій у печах відбувається в умовах «стандартного» температурного режиму [1], проте температура в різних частинах печей різна: у нижній частині печей наближається до мінімально допустимої, у верхній частині – до максимального рівня.

У існуючих наукових роботах не досліджено вплив нерівномірності розподілу температур по обігрівальній поверхні залізобетонних стін протягом вогневих випробувань на достовірність їх результатів.

Використовуючи математичний апарат та моделі, описані в [3–4], опираючись на їх адекватність, доведена в [5], за допомогою комп'ютерного моделювання у даній статті було розглянуто ряд геометричних конфігурацій вертикальних вогневих печей (змінювалися розташування та кількості пальників та отворів для відведення продуктів горіння, тощо) та показано, як конструктивні особливості установки можуть впливати на рівномірність розподілу температур по обігрівальній поверхні стін. У результаті було визначено конфігурацію з найбільш рівномірним розподілом температур на обігрівальній поверхні вертикальної конструкції протягом часу випробувань.

Для проведення досліджень передбачено використання наявних конструкцій установок та осмислення досвіду проектування подібних пристроїв [23] з урахуванням основних вимог [1–5]. Після розроблення вдосконаленої моделі вогневої печі запланований обчислювальний експеримент для перевірки коректної роботи нової конструкції установки.

Більш прийнятною для вдосконалення є конструкція вертикальної вогневої печі ТОВ «ПожТест», оскільки реальний експеримент проведено в одній із таких установок (розділ 3.1).

#### **4.2. Визначення конструктивних параметрів вогневої печі, які забезпечують мінімально можливі дисперсії температур на обігрівальній поверхні стіни під час випробувань на вогнестійкість**

На рис. 4.1 показано геометричні особливості розглянутих конфігурацій установок для проведення випробувань на вогнестійкість несучих стін.

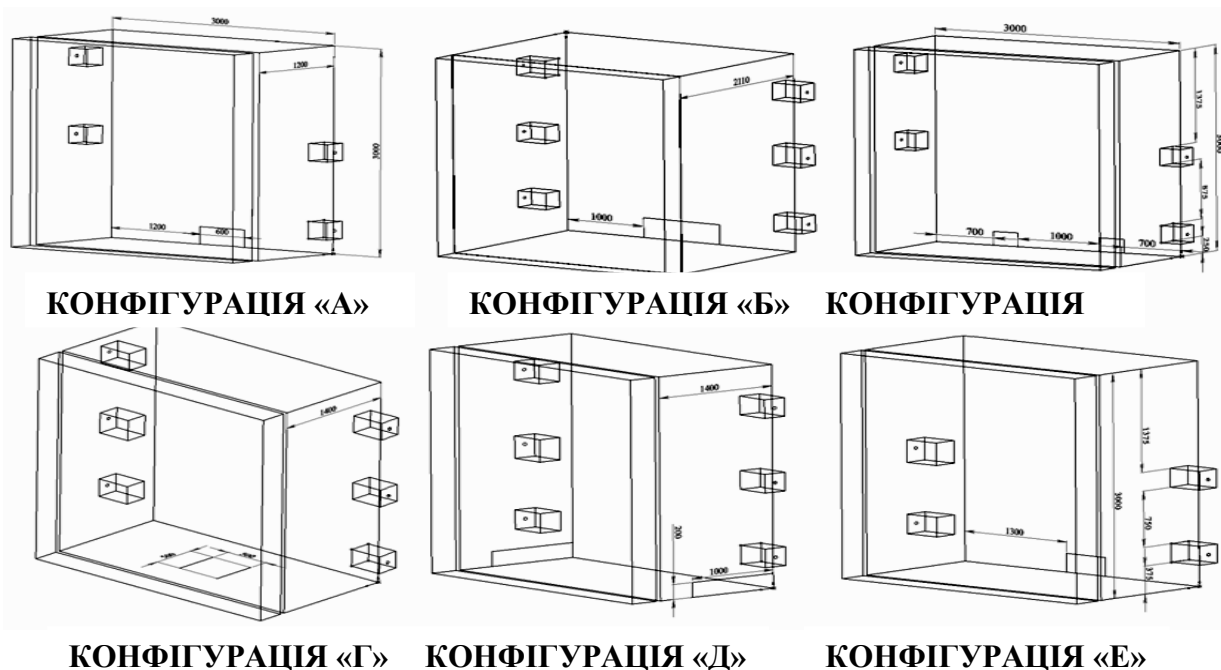


Рис. 4.1 – Конфігурації установок для проведення випробувань на вогнестійкість несучих стін

У даній роботі було розглянуто ряд конфігурацій вогневих печей установок для випробування вертикальних будівельних конструкцій. Кожній з конфігурацій присвоєно одну з літер кирилиці. Для оцінки релевантності роботи змодельованих конструкцій було проаналізовано наступні дані:

- розподіл температур по поверхні конструкції на 60-й хвилині випробувань [7];

- значення дисперсії температур на поверхні кожної зі змодельованих конструкцій камери печі на кожній хвилині обчислювального експерименту та графік зміни їх у часі;

- графік різниці між максимальною та мінімальною температурами на поверхні конструкцій протягом усього часу обчислювального експерименту у моделях.

Конфігурація «А». Змінено розміри, кількість та розташування отворів для відведення продуктів горіння.

У конфігурації «Б» збільшено кількість пальників; змінено розміри, кількість та розташування отворів для відведення продуктів горіння, збільшено глибину печі у порівнянні з вихідною конфігурацією [3].

Конфігурація «В». Додано додаткові отвори для відведення продуктів горіння, крім того, зменшено розмір отвору відносно початкової конфігурації [3].

Для більш рівномірного розподілу температур по вертикалі було створено конфігурацію «Г», у якій отвір для відведення продуктів горіння знаходиться у дні печі.

Конфігурація «Д». Змінено розміщення отворів для відведення продуктів горіння, додано додаткові пальники, які знаходяться на одному рівні з іншими пальниками.

Конфігурація «Е». Змінено розміщення отворів для відведення продуктів горіння, змінено розміщення пальників.

На рис. 4.2 показано розподіл температур по поверхні конструкції у кожній з конфігурацій на 60-й хвилині випробувань.

На наш погляд основними недоліками конфігурації «А» є, порівняно з іншими конфігураціями, невеликий об'єм камери печі, недосконале розташування отворів для відведення продуктів горіння. За рахунок цього залізобетонна конструкція прогрівається нерівномірно. Конструкція прогрівається слабше у середній частині камери печі та над отворами для відведення продуктів горіння.

Змінивши конструкцію внутрішнього простору камери установки, температура ще менш рівномірно розподілилась по обігрівальній поверхні плити. Проте, відбувся більш характерний розподіл температур по вертикалі. У конфігурації «В» було отримано більш рівномірне розподілення температур у порівнянні з конфігураціями «А» та «Б», але через розміщення отворів для відведення продуктів горіння ближче до пальників, але конвективно потоки також були направлені у бік означених отворів і більша температура спостерігалась у цій області.

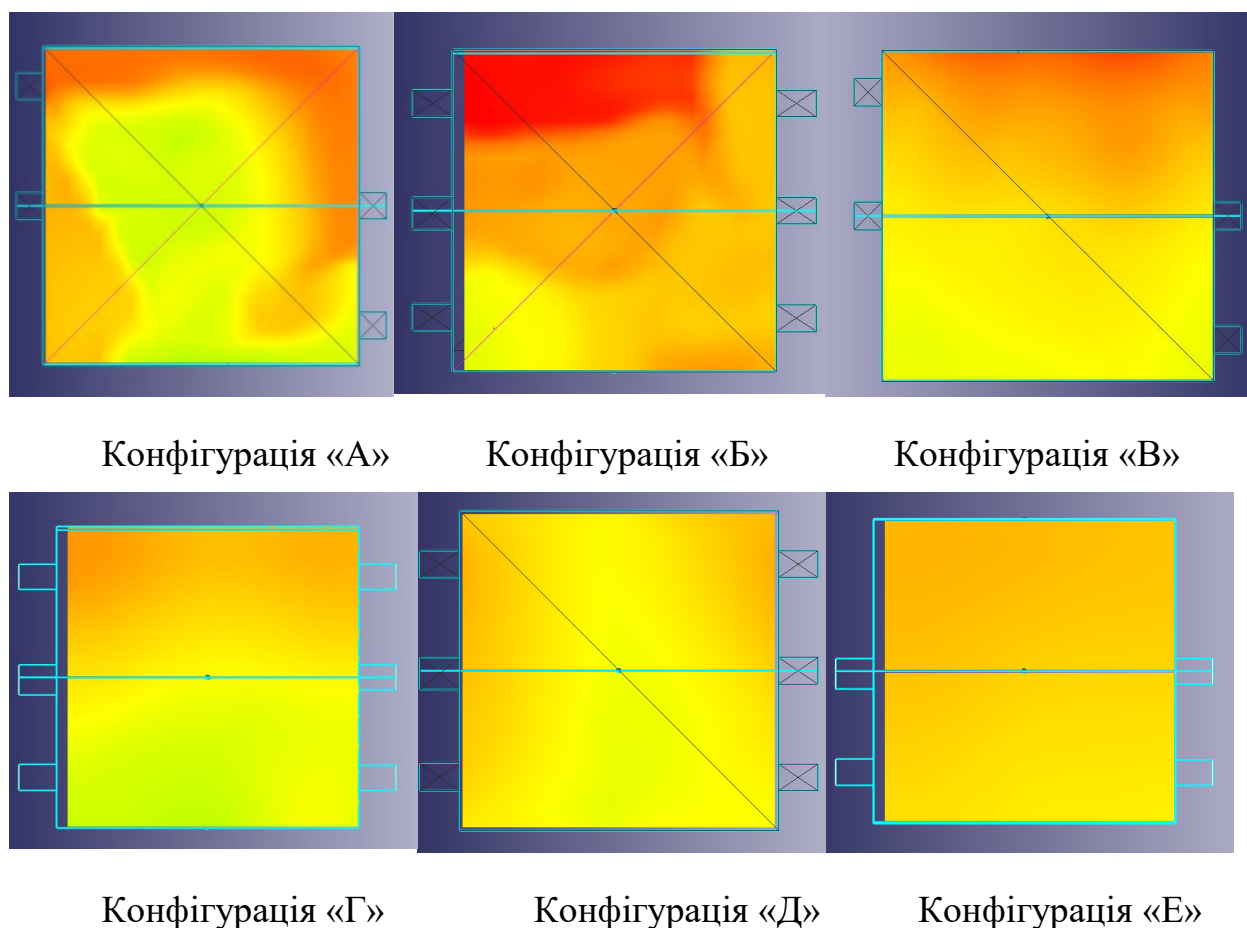


Рис. 4.2 – Градієнт температур по обігрівальній поверхні змодельованих конструкцій

Як видно з рис. 4.2 – г отвір у середній частині дна печі привів до більшої рівномірності прогріву конструкції, в порівнянні з конфігурацією «В». Тому, дослідження роботи конфігурацій вирішено було продовжити.

Наступними у нашому дослідженні розподілу температур стали конфігурації «Е» (рис. 4.1 – є) та «Д» (рис. 4.1 – ж). Переваги конфігурації «Е» у тому, що нагрів відбувається за допомогою 4-х пальників, але їх розміщення змінене, у порівнянні з вихідною конфігурацією (рис. 4.1 – рис. 4.2).

Для більш наочної демонстрації результатів моделювання на рис. 4.3 показано зміну температур на обігрівальній поверхні конструкцій за допомогою ізоляцій [7].

Як видно з рис. 4.3 найменші коливання температури спостерігаються у конфігурації «Е». Спираючись на результати першого етапу досліджень, ми можемо стверджувати, що дана конструкція є найбільш релевантною.

Наступним етапом дослідження стало визначення значення дисперсії температур на поверхні кожної зі змодельованих конструкцій камери печі на кожній хвилині обчислювального експерименту, після чого побудовано графік зміни її у часі.



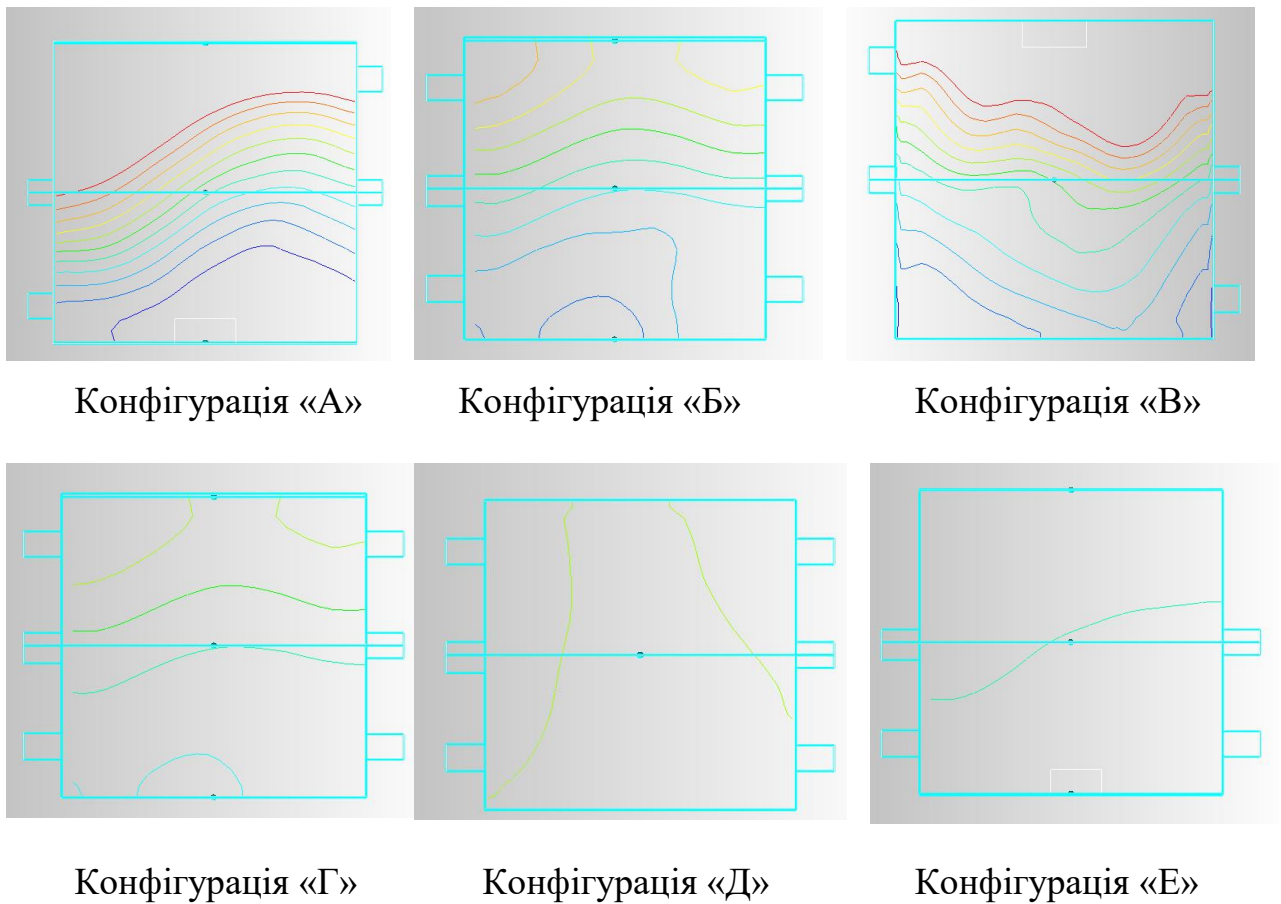


Рис. 4.3 – Ізолінії температур по обігрівальній поверхні змодельованих конструкцій

Засобами комп'ютерної газогідродинаміки CFD FlowVision 2.5 було створено заливки температури на обігрівальній поверхні несучої стіни та отримано розподіл температур на кожній хвилині випробувань для кожної конфігурації [7]. У заливках температур розміщені від 6000 до 7500 комірок (в залежності від особливостей конфігурації), розподілені рівномірно по поверхні конструкції, у яких знаходяться дані щодо температури у будь-який час протягом чисельного дослідження. Опрацювавши ці дані, було розраховано дисперсію температур:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n} \quad (4.1),$$

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

На рис. 4.4 показано дисперсію температур по обігрівальній поверхні несучої стіни під час обчислювального експерименту.

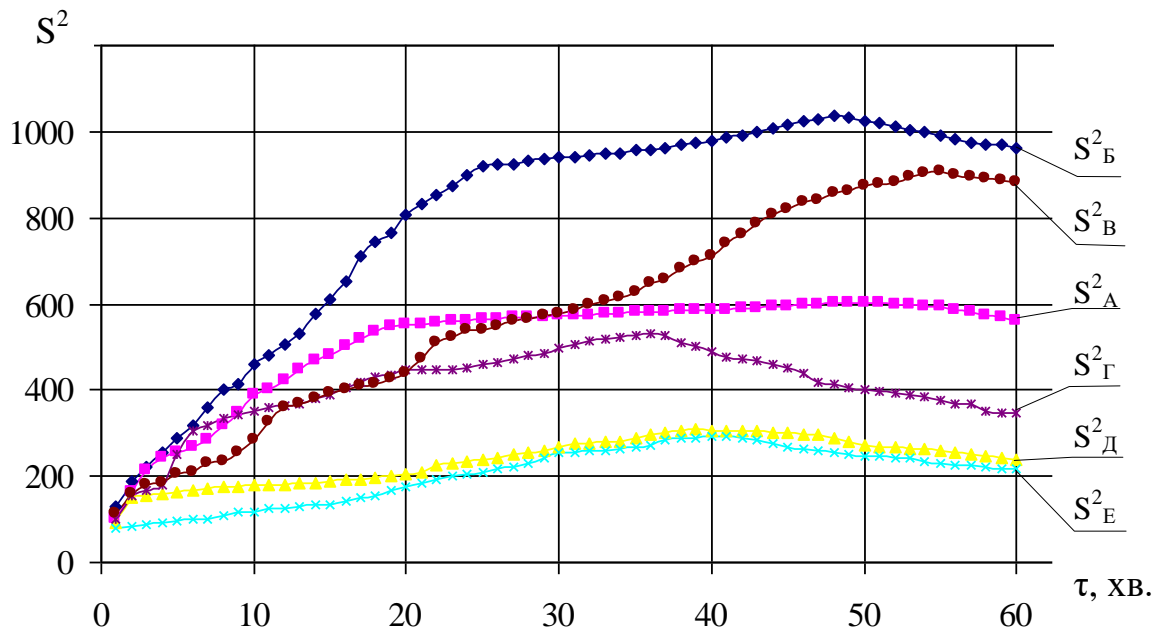


Рис. 4.4 – Дисперсія температур по обігрівальній поверхні несучої стіни під час обчислювального експерименту

У отриманих графіках існує певна особливість: у більшості кривих, які відображають числове значення дисперсії температур, існує екстремум. Після початкової фази, зростання значення дисперсії, вона поступово починає зменшуватись. Це можна пояснити, якщо розглянути стандартну температурну криву пожежі [1]. Більш інтенсивна зміна температури в камері вогневої печі на початкових хвилинах випробувань і поступове зменшення різниці граничних значень максимуму і мінімуму. Тому, ми обмежили дослідження 60-тою хвилиною розрахунку (рис. 4.4).

Ще однією виділеною нами особливістю є те, що чим менше значення екстремуму, тим раніше відносно часової кривої він досягається.

Якщо детально розглянути створені конфігурації, то найменші значення дисперсій на усьому часовому проміжку спостерігаються у конфігураціях «Е» та «Д». Найбільше значення дисперсії у конфігурації «Е» спостерігається на 40-й хвилині випробувань, у конфігурації «Д» – на 41-й хвилині. В цей же час, у конфігураціях «А» та «Б» максимальне значення дисперсії було досягнуто майже на 60-й хвилині.

Розглянувши усі створені конфігурації, можемо сказати, що середнє значення часу, на якому екстремум досягається, 45-та – 50-та хвилина випробувань, коли допустима різниця між максимально та мінімально допустимою температурою в камері печі зменшується [1].

Для того, щоб підтвердити коректність даних графіку рис. 4.4, на рис. 4.5 показано різницю між максимальною та мінімальною температурою на обігрівальній поверхні несучої стіни під час чисельного дослідження.

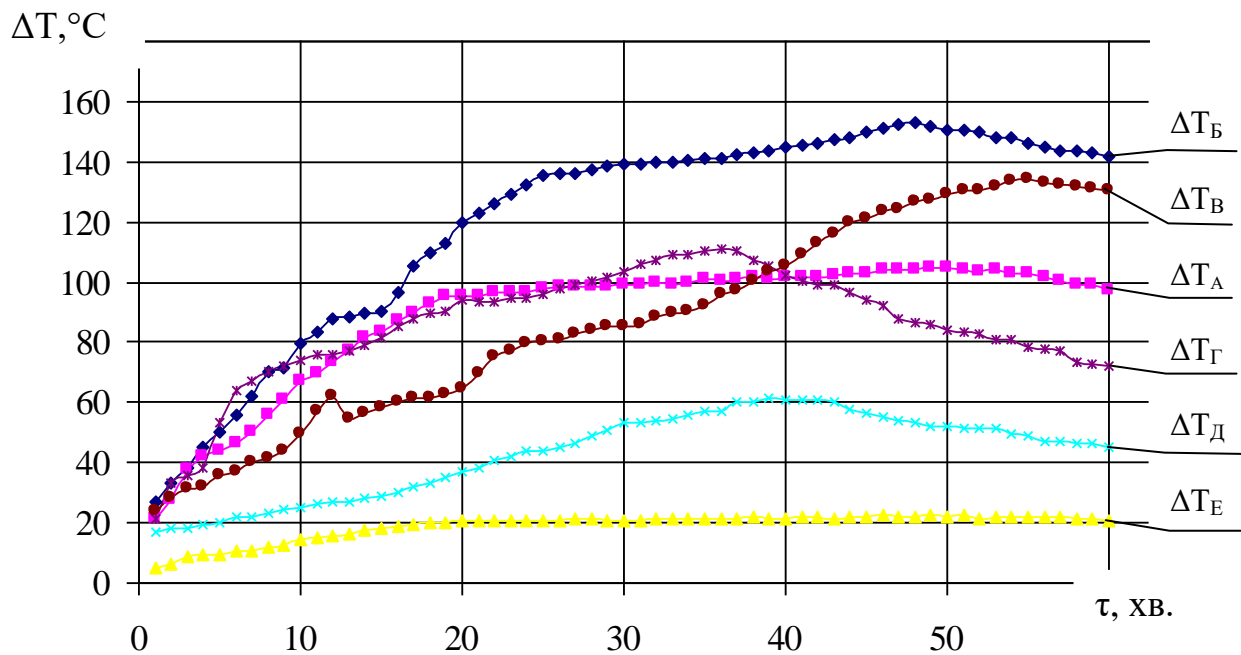


Рис. 4.5 – Різниця між максимальною та мінімальною температурою на обігрівальній поверхні несучої стіни під час обчислювального експерименту

Відповідно до рис. 5 максимальна різниця температур на обігрівальній поверхні несучої стіни у конфігурації «Е» склала 23,4 °С на 40-й хвилині випробувань, у конфігурації «Д» – 61,8 °С на 38-й хвилині.

Розглянувши усі створені конфігурації, можемо сказати, що середне серед усіх конфігурацій максимальне значення різниці температур на обігрівальній поверхні конструкції, спостерігається на 41-й хвилині випробувань, і складає близько 100 °С.

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСІЇ ТЕМПЕРАТУР ПО ОБІГРІВАЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ НЕСУЧИХ СТІН НА ЗНАЧЕННЯ ЇХНЬОЇ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ

#### 5.1. Постановка теплотехнічної задачі щодо визначення несучої здатності залізобетонної стіни в умовах пожежі.

Для дослідження впливу дисперсії температур по поверхні несучих стін на їх межу вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності була розглянута залізобетонна стіна, що представлена на рис. 5.1.

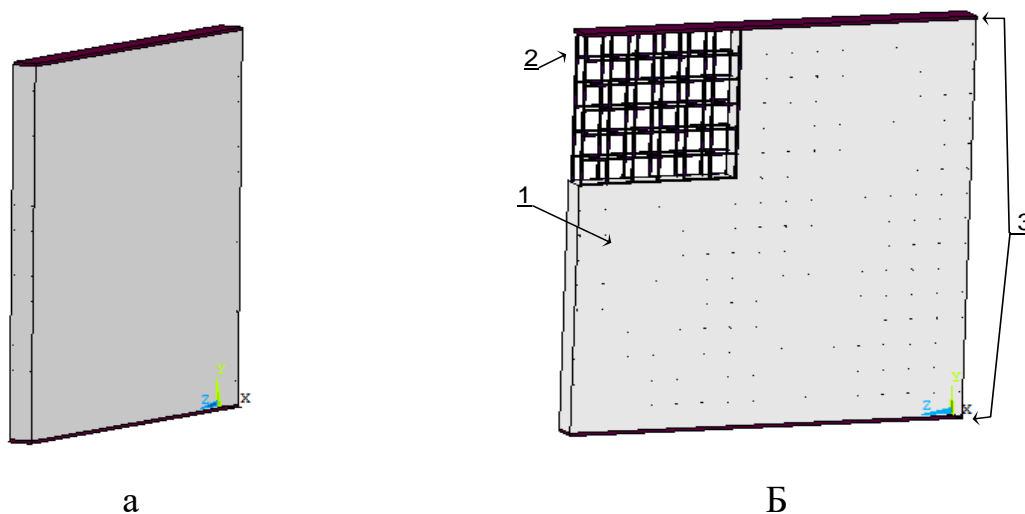


Рис. 5.1 – Схема розрахункової області залізобетонної несучої стіни для проведення розрахунку межі вогнестійкості (а – загальний вигляд, що використовують під час обчислювального експерименту, б – схема армування): 1 – бетон, 2 – робочий арматурний каркас  $d = 16$  мм, 3 – траверси навантажувальної рами

На рис. 5.2 показана геометрична схема перерізу плити.



Рис. 5.2 – Геометрична конфігурація перерізу залізобетонної стіни

Залізобетонна стіна, що наведена на рис. 5.1, має конструкцію, яка широко застосовується для огороження шляхів евакуації. Тому саме така конструкція обрана нами для досліджень.

При визначенні межі вогнестійкості даної стіни за настанням втрати несучої здатності нами була застосована методика, запропонована в роботах [68,69,81,82]. Алгоритм наведений на рис. 5.3 та рис. 5.4 у вигляді блок-схем.

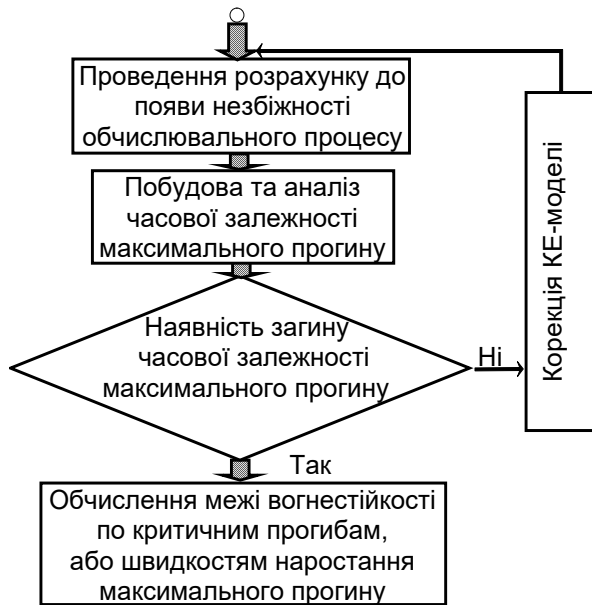


Рис. 5.3 – Структурна схема розрахункових процедур

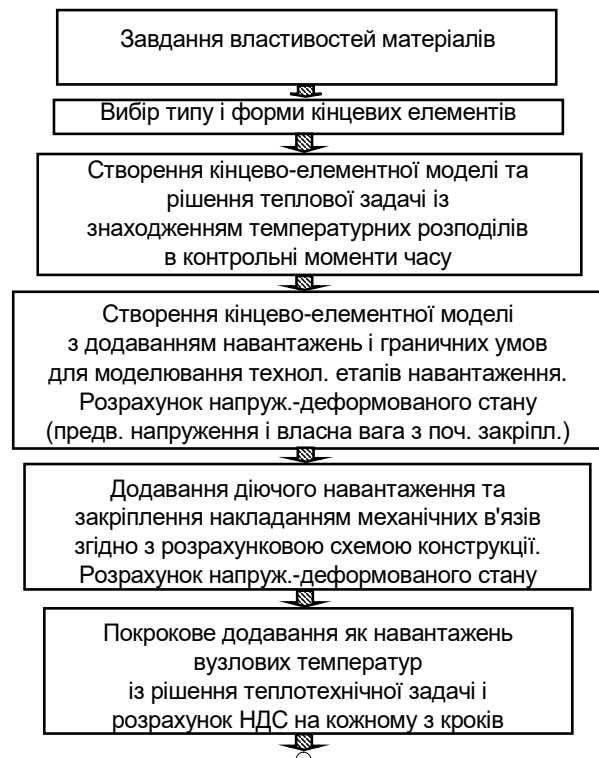


Рис. 5.4 – Структурна схема визначення межі вогнестійкості за розрахованими параметрами.

Теплова задач вирішувалася з використанням даних розподілення температури по обігрівній поверхні стіни, що були визначені нами у попередніх розділах.

Згідно із рис. 5.2 та рис. 5.3 для чисельного моделювання теплової дії на залізобетонну стіну був використаний метод кінцевих елементів (МКЕ).

При розв'язку теплотехнічної задачі як першого етапу нами були прийняті такі основні положення.

1. Для розрахунку використовується квазілінійне параболічне рівняння теплопровідності з граничними умовами (ГУ) III роду при обліку конвекційного і радіаційного теплообміну із середовищем пожежі.

2. Температурний режим пожежного середовища збігається зі стандартною температурною кривою пожежі.

3. У силу великої різниці в температуропровідності арматурної сталі і бетону, теплообмін враховується тільки в бетоні.

4. Внаслідок невеликого впливу теплообміну конвекцією в порожнинах елементів, враховується тільки його радіаційна складова.

5. Теплофізичні характеристики (ТФХ) бетону представляються температурними залежностями згідно з Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004.

6. Рівняння теплопровідності вирішується із застосуванням методу кінцевих елементів (МКЕ) з використанням комп'ютерної системи ANSYS Mechanical.

Рівняння теплопровідності має наступний вигляд [3]:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T), \quad (5.1)$$

де  $\rho(T)$  – густина,

$c_p(T)$  – питома теплоємність,

$\lambda(T)$  – коефіцієнт теплопровідності, залежні від температури  $T$ .

При вирішенні рівняння теплопровідності на обігрівній стороні стіни були використані граничні умови I роду:

$$T_w|_{y=b} = T_\Gamma. \quad (5.2)$$

В даному випадку у кожній вузловій точці обігрівної поверхні прикладається температура, що визначена у результаті розрахунку температури розрахункової області вогневої печі у IV розділі.

Для необігрівної сторони стіни використовуються граничні умови III роду:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_p - T_w), \quad (5.3)$$

де  $T_p$  – температура повітря біля необігрівної сторони стіни,

$T_w$  – температура поверхні елемента,

$\alpha = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С})$  – коефіцієнт теплообміну.

$T_p$  – температура середовища пожежі.

Для розв'язку задачі теплопровідності за методом кінцевих різниць необхідно задатись початковими даними. Згідно із розробленою нами методикою нами були встановлені такі початкові дані:

- початкова температура  $\theta_0 = 20 \text{ °С}$ ;
- просторовий крок інтегрування  $\Delta h \sim 0.02 \text{ м}$ ;
- часовий крок інтегрування –  $\Delta t = 60 \text{ с}$ .

Теплофізичні властивості наведені у табл. 5.1. Дані теплофізичні властивості рекомендовані у стандарті [], що є чинним в Україні.

На рис. 5.5 подані графіки температурних залежностей теплофізичних характеристик бетону, що були побудовані при використанні даних, наведених у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

**Теплофізичні характеристики матеріалів зовнішньої стіни та плити перекриття**

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$ , Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$ , Дж/(м <sup>3</sup> ·°С)	Густина кг/м <sup>3</sup>
Важкий бетон на силікатному заповнювачі ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012		
$2 - 0,2451 \frac{\theta}{100} + 0,0107 \left(\frac{\theta}{100}\right)^2$	$900\rho$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$ , $(900+(\theta - 100))\rho$ при $100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C}$ , $(1000+0,5(\theta-100))\rho$ при $200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}$ , $1100\rho$ при $400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$	2300

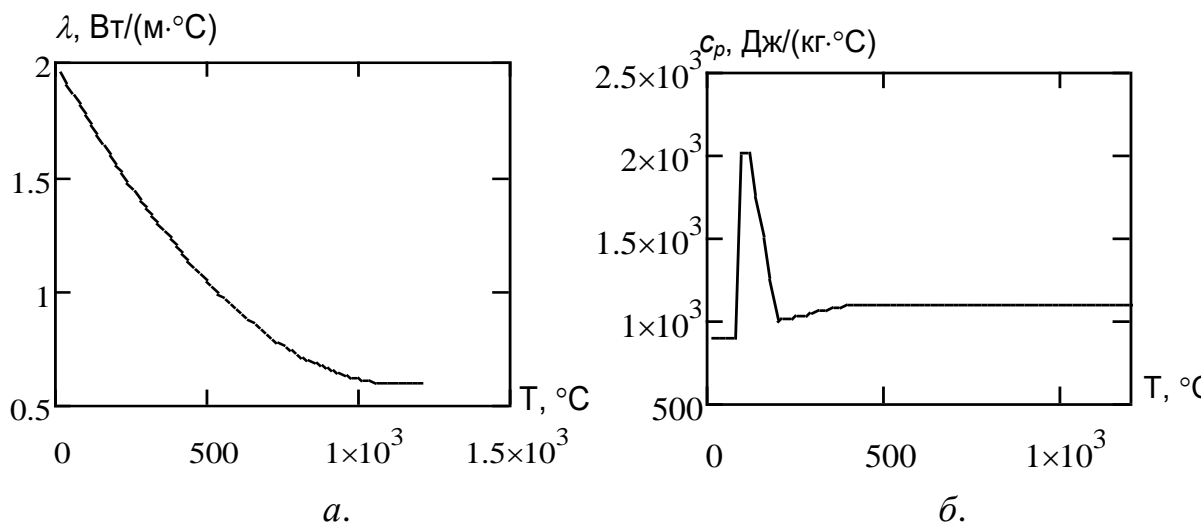


Рис. 5.5 – Теплофізичні характеристики бетону: *а* – коефіцієнт теплопровідності; *б* – питома теплоємність

Для розв'язку теплотехнічної задачі прогрівання досліджуваної залізобетонної стіни була побудована кінцево-різницева схема, яка наведена на рис. 5.6. На даній схемі показані типи граничних умов, що були накладені для здійснення розрахунку.

Для здійснення розрахунку був використаний програмний комплекс ANSYS. При цьому були встановлені параметри обчислювального блоку, подані у табл. 5.2.

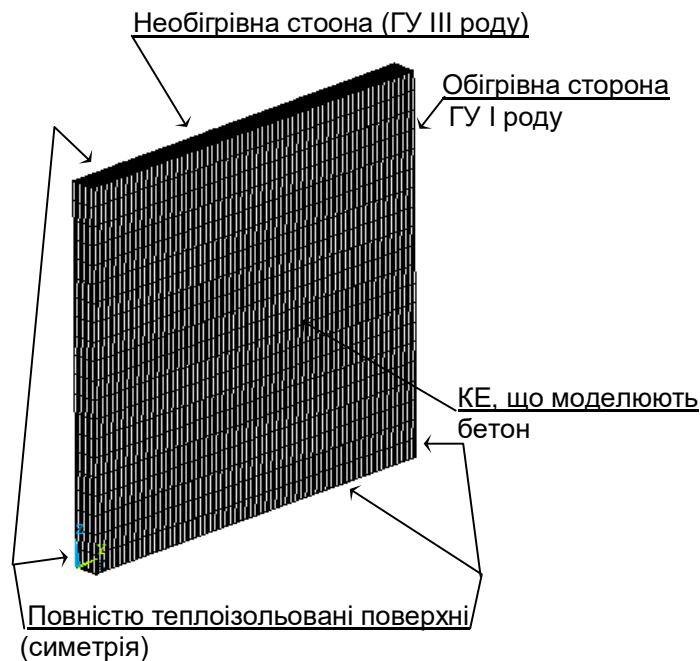


Рис. 5.6 – Кінцево-різницева схема залізобетонної стіни для вирішення теплотехнічної задачі

Таблиця 5.2

### Параметри обчислювального процесу

Параметр обчислювального процесу	Одиниці виміру	Значення
Тип аналізу		Нестационарний
Автоматичний вибір кроку інтегрування		Включений
Часовий крок інтегрування	с (хв.)	60 (1)
Найменший часовий крок	с	10
Найбільший часовий крок	с	60
Максимальна кількість ітерацій		1000
Спосіб прикладання навантаження		Ступінчастий
Тип обчислювальної схеми		Неявна
Точність збіжності обчислень	(%)	0.005 (0,5)
Максимальний час випробування	с (хв.)	320 (19200)

## 5.2. Результати розв'язку теплотехнічної задачі

Після розв'язку теплотехнічної задачі нами були отримані температурні розподіли у залізобетонній стіні, що представлені на рис. 5.7.

Дані, що були нами отримані у результаті теплотехнічного розрахунку, були отримані під час прикладання температур на нову сіткову модель при проведенні лінійної інтерполяції. Це пояснює те, що картина поверхневого розподілення не обігрівної сторони дещо відрізняється від вихідних



розподілів. Подібні розподіли були отримані нами під час вирішення теплотехнічної задачі для інших модифікацій вогневих печей.

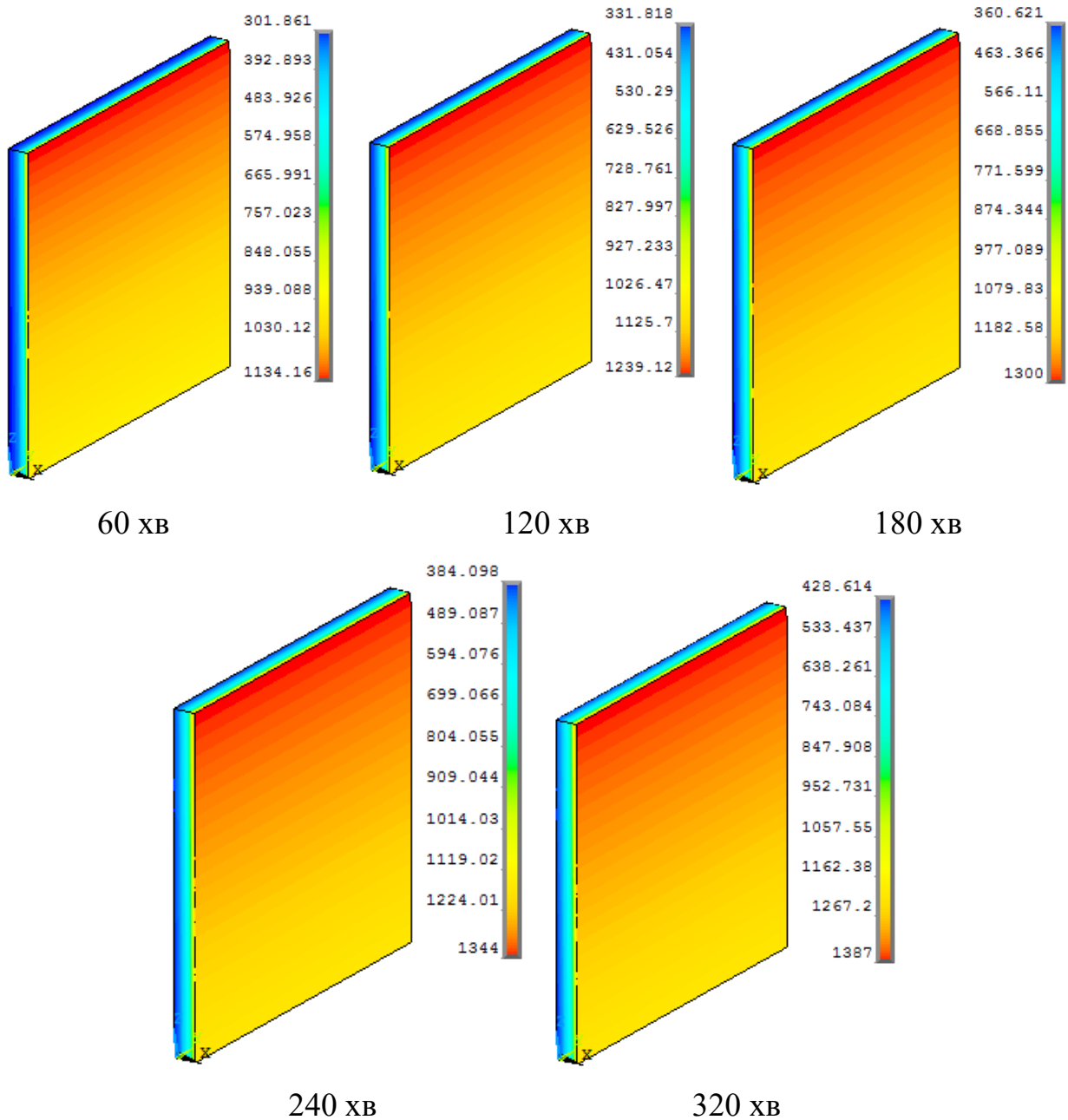


Рис. 5.7 – Температурні розподіли (K) у залізобетонній стіні, що були отримані у результаті теплотехнічного розрахунку, у різні моменти часу її вогневого випробування

### **5.3. Постановка задачі міцності щодо визначення несучої здатності залізобетонної стіни в умовах пожежі.**

Використовуючи підхід, наведений на рис. 5.3 та рис. 5.4, була поставлена міцнісна задача. Дана задача була поставлена при врахуванні таких положень.

1. Для розрахунку використовується система рівнянь НДС твердого тіла.

2. Властивості матеріалу залежать від поточної деформації і температури нелінійно, а також допускаються великі деформації елементів конструкцій, що співставляються з їх розмірами.

3. Для визначення температурного впливу використовуються температурні розподіли, що є результатами попередньо вирішеної теплотехнічної задачі для стандартної температурної кривої пожежі.

4. Система рівнянь вирішується чисельно, методом кінцевих елементів у комбінації з методом Ньютона – Рафсона, шляхом покрокового додавання діючого механічного навантаження на початковому етапі і покрокового додавання температурних навантажень на заключному етапі з інтервалом 1 хв.

5. Для моделювання НДС залізобетону при пожежі використовуються повні діаграми деформування для бетону та арматури з спадаючої гілкою.

6. Робота пошкодженого елемента і умови його пошкодження визначається відповідною теорією міцності бетону.

7. Критерієм глобального руйнування елемента залізобетонної будівельної конструкції є:

- поява незбіжності обчислювального процесу через порушення геометричної незмінюваності системи;
- досягнення критичних пластичних деформацій в кінцевих елементах моделі;
- досягнення критичних величин глобальних переміщень точок елементів залізобетонних будівельних конструкцій.
- досягнення критичних величин швидкості наростання глобальних переміщень точок елементів залізобетонних будівельних конструкцій

Базові математичні моделі, що були використані при розв'язку міцнісної задачі, наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

**Основні розрахункові математичні моделі  
напружено-деформованого стану залізобетону (НДС)**

Особливість поведінки залізобетону	Використовувана математична модель
Базові рівняння НДС.	Розв'язні рівняння методу кінцевих елементів (МКЕ).
Пластична деформація сталі.	Багатошарова модель Беселінга асоціативної теорії пластичності.
Фізична й геометрична нелінійність поведінки залізобетону.	Ітеративний метод Ньютона – Рафсона.
Критерій руйнування бетону.	Складений критерій Віллема й Варнке.
Теплофізичні та механічні властивості бетону й арматурної сталі.	Згідно із стандартом [102].

Згідно із прийнятою розрахунковою схемою на рис. 5.1 виготовлена з важкого бетону на гранітному заповнювачі класу С30/35 (В30). Арматурний каркас виготовлений з арматурної сталі класу міцності А500С. Згідно з даними вимогами міцнісні властивості бетону та арматурної сталі наведені у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

**Міцнісні властивості бетону та арматурної сталі**

Матеріал	Клас міцності	Позначення	Нормативна міцність, МПа
Бетон	С 30/35	$f_{ck,t}$	30
Арматурна сталь	А500С	$f_{yk,t}$	500

Для врахування зниження міцності бетону під час його нагрівання початкова міцність помножується на коефіцієнт зниження міцності:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(T) f_{ck,t}, \quad (5.3)$$

де  $k_{c,t}(\theta)$  – коефіцієнт зниження міцності бетону у залежності від температури.

При врахуванні нелінійності деформування бетону застосовується спеціальна діаграма, яка визначається формулами:

$$\text{при } 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,T}, \quad \sigma(\varepsilon_c) = \frac{3\varepsilon_c f_{ck,t}(T)}{\varepsilon_{c1,T} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,T}} \right)^3 \right)}, \quad (5.4)$$

$$\text{при } \varepsilon_{c1,T} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cul,T}, \quad \sigma(\varepsilon_c) = f_{ck,t}(T) - \frac{f_{ck,t}(T)(\varepsilon_c - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{cul,t} - \varepsilon_{c1,T}},$$

$\varepsilon_c$  – відносна деформація бетону,

$\varepsilon_{c1,T}$  – відносна деформація, до якої діаграма деформування зростає,

$\varepsilon_{cul,T}$  – гранична відносна деформація.

Дані параметри можна визначити за табл. 5.5.

Таблиця 5.5

**Значення типових параметрів діаграми «напруження – деформація» для звичайного бетону на силікатному та карбонатному заповнювачі при підвищених температурах**

Температура бетону, $\theta$ , °C	Силікатний заповнювач			Карбонатний заповнювач		
	$k_{c,t}(\theta)$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cul,\theta}$	$k_{c,t}(\theta)$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cul,\theta}$
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

Для врахування зниження міцності арматурної сталі під час її нагрівання початкова міцність помножується на коефіцієнт зниження міцності:

$$f_{sy,t}(\theta) = k_s(T) f_{yk,t}, \quad (5.5)$$

де  $k_s(\theta)$  – коефіцієнт зниження міцності бетону у залежності від температури.

Для діаграм деформування арматурної сталі робочі формули мають такий вигляд:

$$\text{при } 0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s0} \quad \sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}
&\text{при } \varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} & \sigma_s = f_{sp,T} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}, \\
&\text{при } \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st} & \sigma_s = f_{sy,T}, \\
&\text{при } \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2} & \sigma_s = f_{sy,T} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})], \\
&\text{при } \varepsilon_{s2} < \varepsilon_s & \sigma_s = 0,
\end{aligned}$$

де  $a, b, c$  – параметри, що визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}
a^2 &= (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp} + c/E_{s,T}), \quad b^2 = c(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} + c^2 \\
c &= \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})},
\end{aligned} \tag{5.7}$$

де  $\varepsilon_{sy}$  – деформація, при якій настає межа текучості,  
 $\varepsilon_{st}$  – деформація, при якій починається спадна ділянка діаграми,  
 $f_{sp,T}$  – границя пропорційності сталі,  
 $E_{s,T}$  – модуль пружності сталі, залежний від температури нагрівання.

При врахуванні нелінійних деформацій арматурної сталі також визначається зміна межі пропорційності у залежності від температури. Всі дані параметри можна визначити з табл. 5.6.

Таблиця 5.6

**Значення параметрів діаграми «напруження – деформація»  
гарячекатаної та холоднотягнутої арматурної сталі при підвищених  
температурах**

Температура сталі $\theta$ [°C]	$f_{sy,\theta}/f_{yk}$		$f_{sp,\theta}/f_{yk}$		$E_{s,\theta}/E_s$	
	гарячекатана	холоднотягнута	гарячекатана	холоднотягнута	гарячекатана	холоднотягнута
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Використовуючи дані щодо міцності, були побудовані діаграми деформування бетону та арматурної сталі. Побудовані діаграми наведені на рис. 5.8.

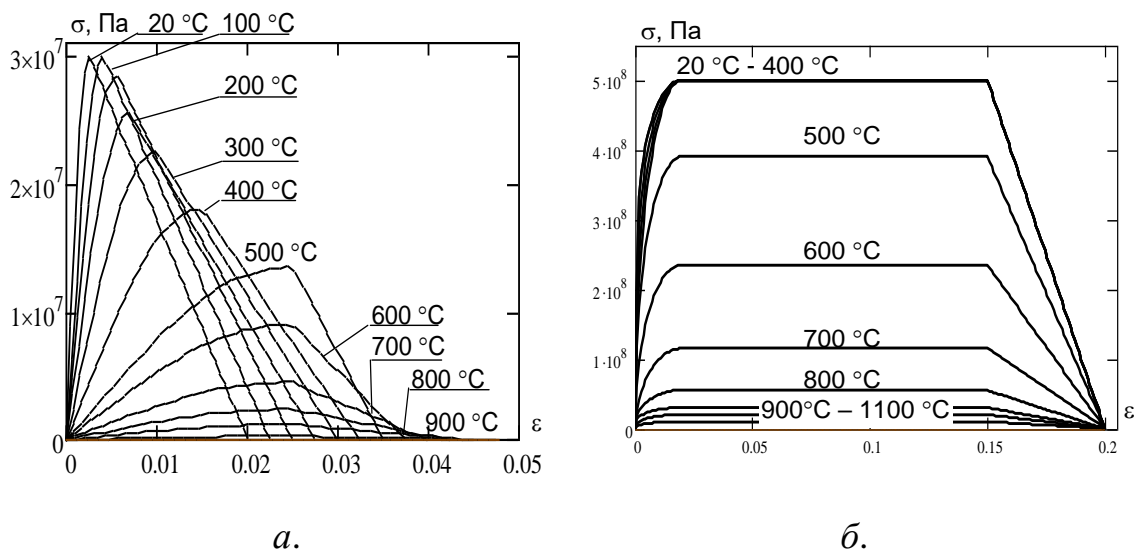


Рис. 5.8 Діаграми деформування бетону (а) та арматурної сталі (б).

Для розрахунку використані температурні залежності деформації терморозширення бетону та арматурної сталі згідно із рекомендаціями стандарту [3]. Використані залежності у вигляді графіків наведені на рис. 5.9.

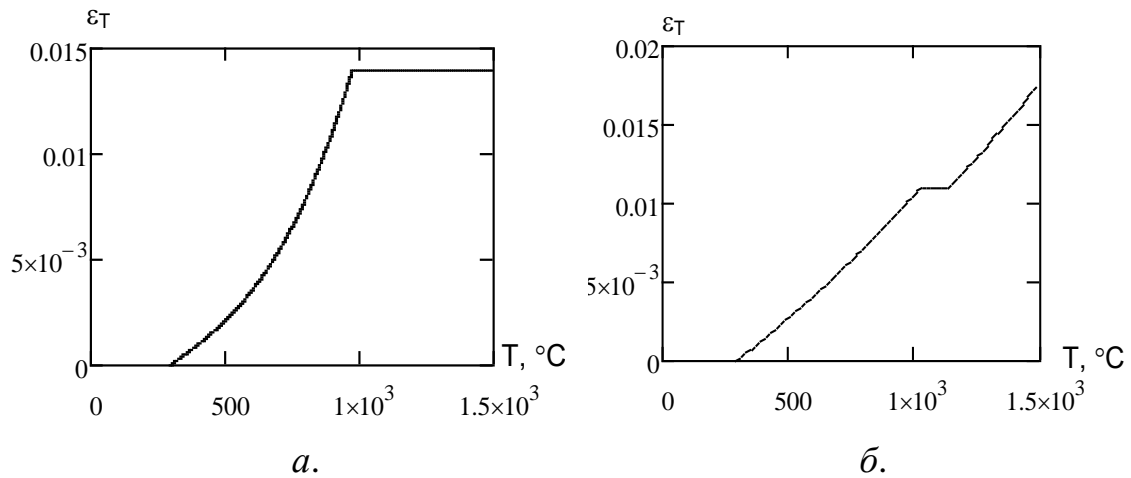


Рис. 5.9 Температурні залежності деформації терморозширення бетону (а), арматурної сталі (б)

Для розв'язку міцнісної задачі була побудована кінцево-елементна схема, що наведена на рис. 5.10.

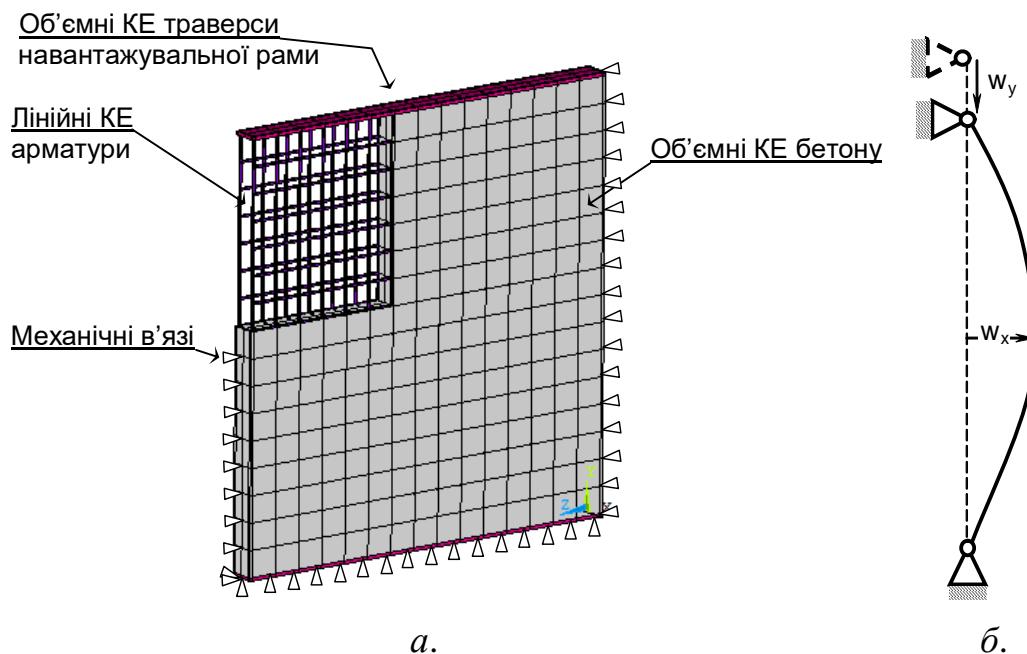


Рис. 5.10 – Кінцево-елементна схема залізобетонної стіни та накладених на її вузли механічні в'язі (а), розрахункова схема закріплення стіни (б)

Застосовуючи весь комплекс математичних моделей згідно із алгоритмом використаної методики виконувалися розрахунки щодо визначення параметрів НДС залізобетонної стіни.

#### 5.4. Результати розв'язку задачі міцності

Після розв'язку міцнісної задачі був отриманий набір даних щодо НДС залізобетонної стіни в умовах температурного впливу вогневих випробувань. На рис. 5.11 наведені дані щодо розподілень значення першого головного напруження у різні моменти часу температурного впливу при вогневому випробуванні.

На рис. 5.12 зображено розподіл виникнення тріщин у стіні внаслідок комбінованого температурно-силового впливу.

Нормаль до країв тріщини відповідає нормалі окружності, яка символізує тріщину. Червоним кольором позначено первинні тріщини, що отримано в точках інтегрування. Відповідно зелений і синій кольори – вторинні та третинні тріщини. Після виникнення тріщин елемента у трьох точках інтегрування у трьох різних напрямках цей елемент вважають зруйнованим. Це значить, що даний елемент не опирається прикладеним напруженням.

Аналіз розподілу тріщин дозволяє зазначити, що основні пошкодження стіни виникають у верхній її частині, де температура істотно вища, найбільше ушкоджень починає з'являтися після 150 хв температурного впливу під час випробувань, руйнація стіни відбувається на 281 хв у результаті накопичення дефектів у бетоні.

Більше даних про накопичення дефектів у стіні можна отримати з картини повністю роздроблених елементів у залізобетонній стіні. Така картина у різні моменти часу наведена на рис. 5.13.

Аналіз розподілу найбільш ушкоджених елементів показав, що їх найбільша кількість утворюється у верхній частині стіни, там, де найбільша температура, роздроблені елементи зосереджені у поверхневій зоні ближче до обігрівної сторони.

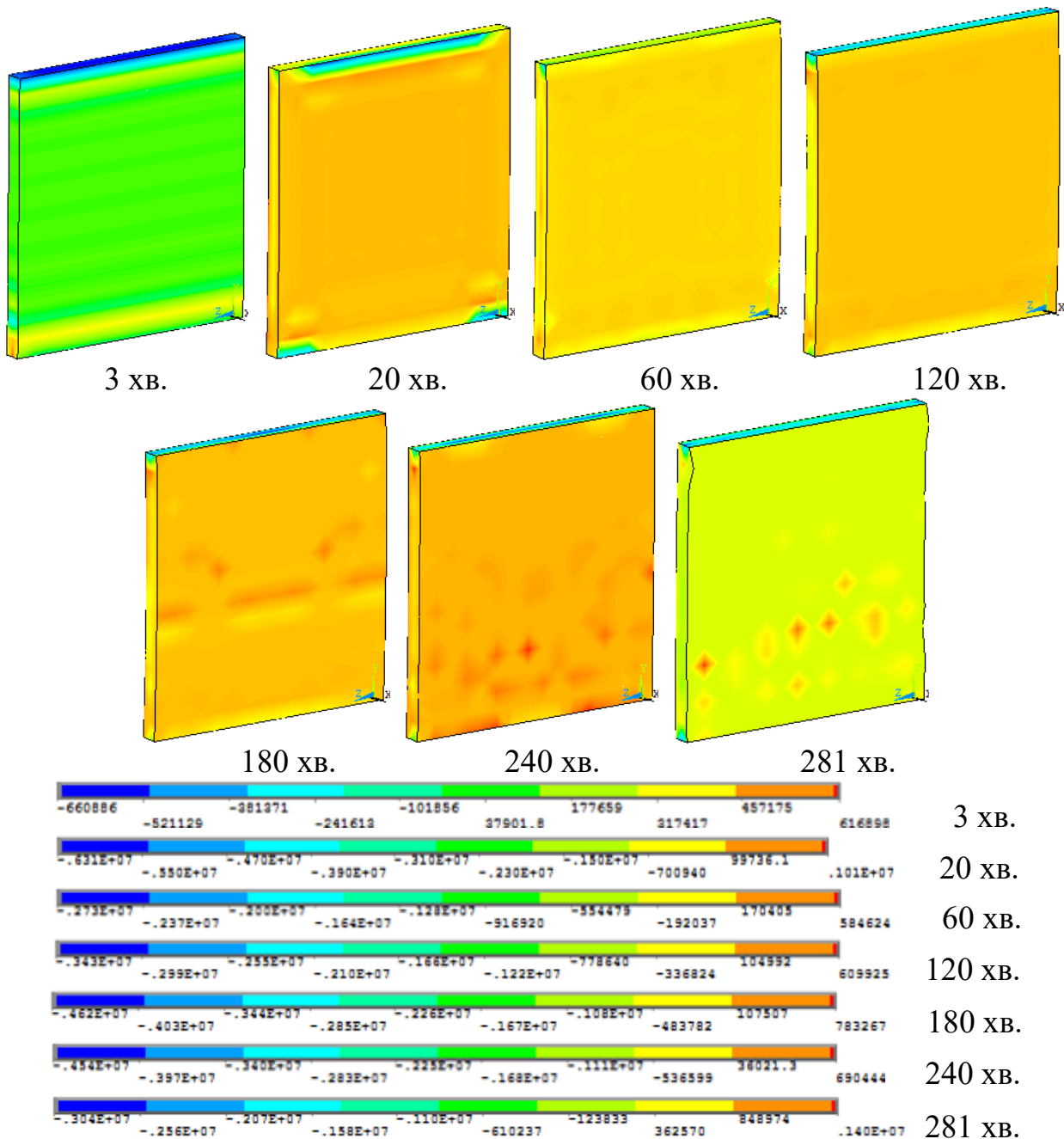


Рис. 5.11 – Розподіл значень першого головного напруження (Па) у залізобетонній стіні у різні моменти часу випробувань



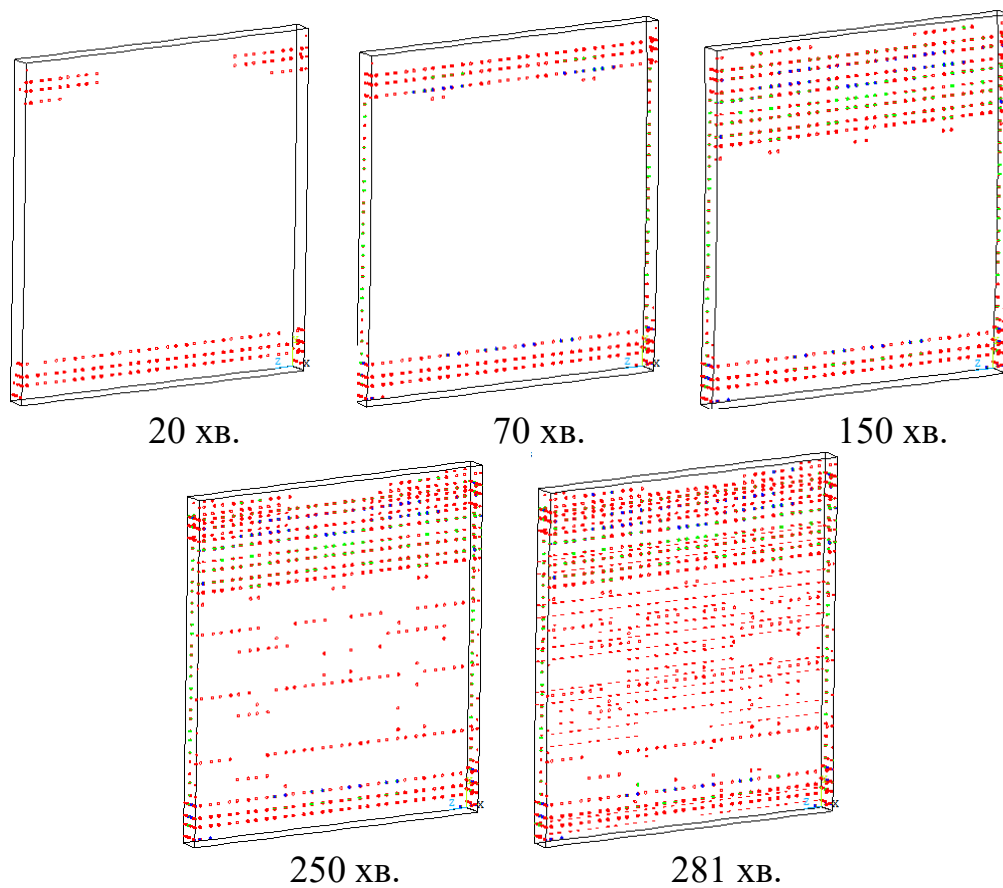


Рис. 5.12 – Розподілення тріщин у залізобетонній стіні у різні моменти часу випробування

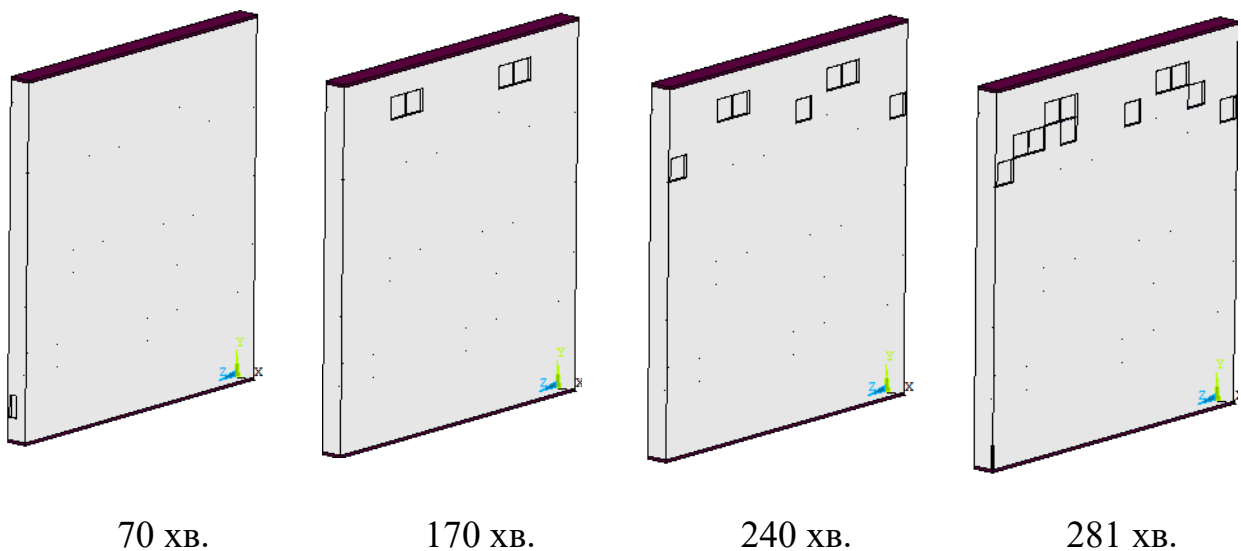


Рис. 5.13 – Положення повністю роздроблених кінцевих елементів у залізобетонній стіні у різні моменти часу її вогневих випробувань

Згідно із методикою визначення межі вогнестійкості конструкції, що наведена на рис. 5.3, настання граничного стану втрати несучої здатності визначається за графіками максимальних переміщень стіни. На рис. 5.14

наведені графіки залежностей максимального поздовжнього переміщення середньої точки перерізу стіни та її максимального прогину.

Перехрещення дотичних на даних графіках показують межу настання граничного стану втрати несучої здатності. Таким чином, граничний стан втрати несучої здатності досліджуваної залізобетонної стіни настає на 280 хв.

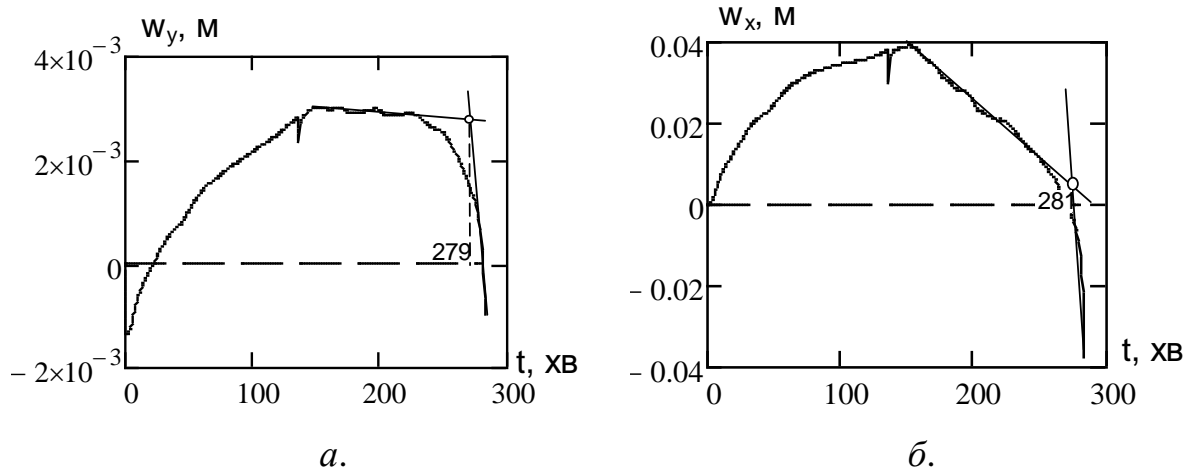


Рис. 5.14 – Графіки максимального поздовжнього переміщення (а) та максимального прогину (б).

Аналогічні розрахунки були проведені для стін з іншими модифікаціями і для них також були визначені межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності.

На рис. 5.15 показані графіки, що отримані для відповідних модифікацій вогневої печі.

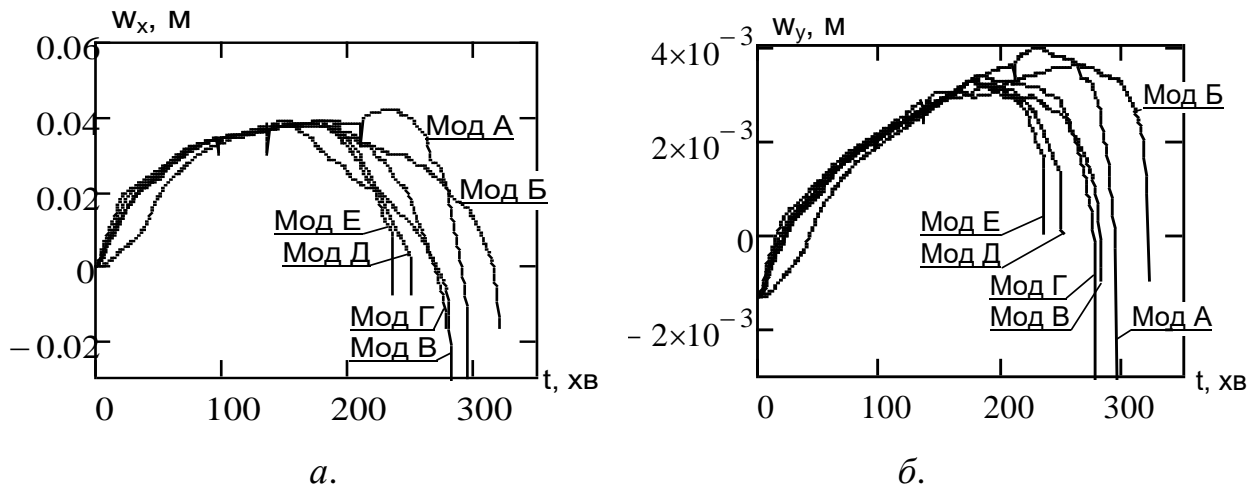


Рис. 5.15 – Графіки максимального поздовжнього переміщення (а) та максимального прогину (б) в залізобетонній стіні, що випробовується у печах із різними конфігураціями.

Спираючись на отримані дані, наведені на рис. 5.13, були визначені межі вогнестійкості досліджуваної стіни в умовах вогневих випробувань у печах із різними модифікаціями. При цьому був використаний алгоритм, що показаний на рис 5.4. Отримані дані, щодо вогнестійкості, зведені до табл. 5.7.

**Межі вогнестійкості залізобетонної стіни, випробуваної у вогневих печах із різними модифікаціями**

Модифікація печі	Дисперсія температури, $S^2$ , $^{\circ}\text{C}^2$	Межа вогнестійкості, R, хв
Модифікація А	586.59	281
Модифікація Б	803.557	301
Модифікація В	512.475	277
Модифікація Г	406.164	271
Модифікація Д	238.902	248
Модифікація Е	205.295	235

З метою вивчення відповідності результатів розрахунку до реальних процесів, що відбуваються в системі, наскільки якісно прогнозуватиметься розвиток цих процесів, було проведено порівняння даних випробувань, що були наведені у 3 розділі цієї роботи. Збіжність результатів обчислювального та реального експерименту перевірена за допомогою визначення величини вертикального переміщення навантаженого краю стіни. Отриманий результат наведений на рис. 5.16.

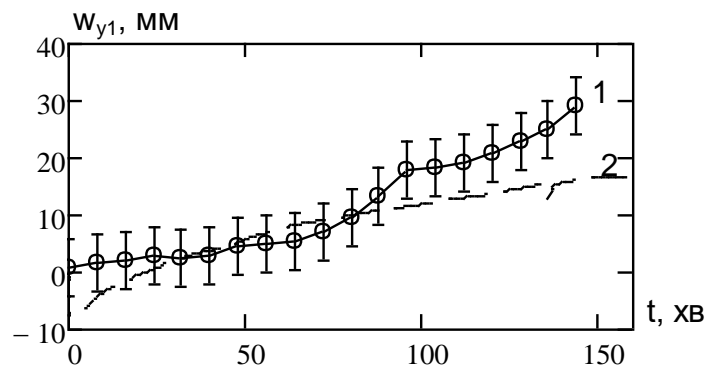


Рис. 5.16 – Графіки переміщення верхнього краю стіни у залежності від часу при її випробуванні на вогнестійкість: 1 – експериментальні дані разом із експериментальною похибкою; 2 – розрахункові дані

За даними табл. 5.7, побудовані графіки розрахункових значень межі вогнестійкості залізобетонної плити від значення максимальної дисперсії температур на обігрівальній поверхні залізобетонної стіни під час вогневих випробувань та похибки визначення межі вогнестійкості відносно самого найменшого її значення. Дані графіки наведені на рис. 5.17.

За даними графіків побудована регресійна залежність межі вогнестійкості залізобетонної стіни від дисперсії температур на їхніх обігрівальних поверхнях, а також похибки визначення межі вогнестійкості, що виражається формулою:

$$\Delta(S^2) = -42.586 + 0.307 \cdot S^2 - 5.355 \cdot 10^{-4} \cdot (S^2)^2 + 3.276 \cdot 10^{-7} \cdot (S^2)^3, \quad (5.8)$$

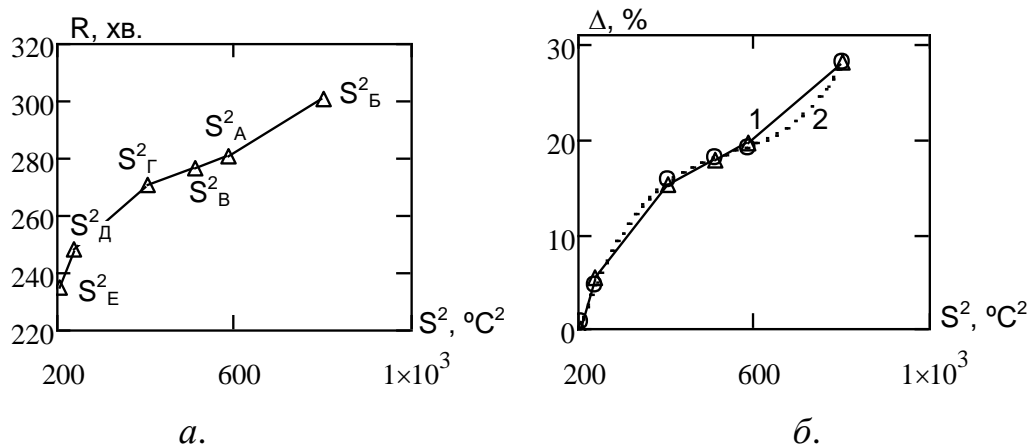


Рис. 5.17 – Залежність розрахункових значень межі вогнестійкості залізобетонної стіни від значення максимальної дисперсії температур на обігрівальній поверхні конструкції під час вогневих випробувань (*а*) та похибки визначення межі вогнестійкості (*б*) (1 – отриманої внаслідок чисельного експерименту, 2 – регресійна залежність)

Проведені дослідження з виявлення залежності межі вогнестійкості залізобетонної стіни від дисперсії температур на їхніх обігрівальних поверхнях уможливили формулювання узагальнених рекомендацій для проектування нових і вдосконалення параметрів наявних вертикальних установок для випробування будівельних конструкцій із метою досягнення в камері печі однорідності температурного поля на обігрівальних поверхнях конструкцій, а також як наслідок – підвищення ефективності випробувань на вогнестійкість за рахунок забезпечення більшої рівномірності теплового потоку:

1. Як основу конструкції установки необхідно використовувати піч, геометрична форма, розміри й конструкція якої повинні надавати змогу випробовувати зразки різних будівельних конструкцій, зокрема з елементами вогнезахисту, забезпечуючи при цьому рівномірність теплового потоку.

2. Отвір для відведення продуктів горіння, слід розташовувати у нижній частині камери вогневої печі.

3. Висота печі має забезпечувати необхідний мінімальний об'єм для циркуляції продуктів горіння, а отже, рівномірний прогрів поверхні конструкції.

4. Пальники слід розташовувати не ближче ніж на 0,8 м від поверхні досліджуваної конструкції.

5. Кількість приладів для контролю температурного режиму в камері печі (термопар) повинна залежати від геометричних розмірів печі (одна термопара на 1 м<sup>2</sup> обігрівальної поверхні аналізованої будівельної конструкції), але не меншою, ніж п'ять [1].

6. Значення дисперсії температур по обігрівальній поверхні залізобетонної конструкції не повинно перевищувати критичного значення – 600 (рис. 4.4).

7. Управління роботою паливної системи та реєстрацію результатів випробувань потрібно організовувати за допомогою обчислювальної техніки (комп'ютера).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В. 1.1-4-98\*. [Чинний від 1998-10-28.] – К. : Укрархбудінформ, 2005. – 20 с. – (Національний стандарт України).
2. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. (ISO 834: 1975) ГОСТ 30247.0-94. [Введен в действие 1996-01-01] – М. : Стройиздат, 2003. – 7 с. – (Национальный стандарт РФ).
3. EN 13501-1:2002 «Fire classification of construction products and building elements» – Part 1.2. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
4. Захист від пожежі. Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. ДСТУ Б В.1.1-18:2007. [Чинний від 2007-10-26.] – К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 9 с. – (Національний стандарт України).
5. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2002. – [Чинний від 2003-05-01]. – К. : Держбуд України, 2003. – 87 с. – (Державні будівельні норми України).
6. Метрологічні особливості вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість / С. В. Поздєєв, О. М. Тищенко, О. М. Нуянзін [та ін.] // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2011. – № 8. – С. 73–79.
7. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. ДСТУ 2272:2006. [Чинний від 2006-10-01]. – К. : Держспоживстандарт України 2006. – 30 с. – (Національний стандарт України).
8. Будівельні матеріали. матеріали будівельні. Методи випробувань на горючість. ДСТУ Б В.2.7-19-95 (ГОСТ 30244-94). [Чинний від 1996-09-01]. – К. : Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1995. – 32 с. – (Національний стандарт України).
9. Будівельні матеріали. Методи випробувань на займистість. ДСТУ Б В.1.1-2-97 (ГОСТ 30402-96). [Чинний від 1998-01-01]. – К. : Держкоммістобудування, 1997. – 32 с. – (Національний стандарт України).
10. Матеріали будівельні. Метод випробувань на поширення полум'я. ДСТУ Б В.2.7-70-98 (ГОСТ 30444-97). [Чинний від 01.10.1998]. – К. : ЦНИИСК. – 12 с. – (Державний Стандарт України).
11. ДСТУ Б В.1.1-2-97. Захист від пожежі. Матеріали будівельні. Метод випробування на займистість. [Чинний від 1998-01-01]. – К. : Укрархбудінформ, 1997. – 34 с.
12. Згуря В. І. Удосконалення системи визначення пожежонебезпечних властивостей речовин, матеріалів та будівельних конструкцій : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук : 21.06.02 «Пожежна безпека» / В. І. Згуря ; Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки МНС України. – К., 2007. – 21 с.
13. Вознесенский А. А. Тепловые установки в производстве строительных материалов / А. А. Вознесенский. – К. : Стройиздат, 1958. – 372 с.
14. Зобнин Б. Ф. Нагревательные печи. Теория и расчет / Б. Ф. Зобнин. – М. : Машиностроение, 1964. – 312 с.
15. Преобразователи термоэлектрические Номинальные статические характеристики преобразования ГОСТ 3044-84. [Чинний від 01.01.1986]. – М. :

Министерство приборостроения, средств автоматизации и систем управления, 1986. – 20 с. – (Национальный стандарт РФ).

16. Конструкції будинків і споруд. Вироби будівельні, бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантажуванням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості ДСТУ Б В.2.6-7-95 (ГОСТ 8829-94) [Чинний від 17.11.1994]. – М. : НИИЖБ, 1994. – 28 с. – (Державний стандарт України).

17. Перекрытия та покрытия. Метод випробування на вогнестійкість ДСТУ Б В. 1.1-20:2007. [Чинний від 26.10.2007]. – К. : УкрНДІПБ, НДІБК. – 10 с. – (Державний Стандарт України).

18. Предупреждение дефектов в строительстве. Защита материалов и конструкций / А. Грасник, Э. Грюн, В. Фикс, В. Хольцапфель и др. ; пер. с нем. и науч. ред. Ю. М. Веллер. – М. : Стройиздат, 1989. – 213 с.

19. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром. – М. : Стройиздат, 1987. – 80 с.

20. Огнестойкость центрально-сжатых железобетонных элементов. Пожарная безопасность. Организационно-техническое обеспечение / С. Л.Фомин, О. А. Стельмах, Джафар Шакер Шахин. – Х. : ХИПБ МВД Украины, 1996. – С. 78–81.

21. Хасанов И. Р. Развитие методов исследования огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций и инженерного оборудования / И. Р. Хасанов, В. И. Голованов // Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России / под общей редакцией Н. П. Копылова. – М. : ВНИИПО, 2007. – С. 121–158.

22. Harmathy T. Z. The fire resistance test and its relation to real world fires / T. Z. Harmathy // Fire and Materials. – 1981. – Vol. 5. – № 3. – P. 59–65.

23. Новак С. В. Методи випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість / С. В. Новак, Л. М. Нефедченко, О. О. Абрамов. – К. : Пожінформтехніка, 2010. – 132 с.

24. Яковлев А. И. Расчетная оценка поведения железобетонных колонн при режимах пожара, отличных от «стандартного». Тепло- и массообмен в технологических процессах производства и при пожарах / А. И. Яковлев, Б. Б. Григорян // Сб. научн. тр. ВИПТШ МВД СССР. – М., 1983. – С. 147–153.

25. Измаилов А. С. Оценка поведения железобетонных колонн при температурных режимах пожара, учитывающих стадию затухания / А. С. Измаилов, В. Н. Демехин, Б. Б. Григорян // Горючесть материалов и обнаружение пожаров. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1986. – С. 33–46.

26. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А. И. Яковлев. – М. : Стройиздат, 1988. – 144 с.

27. Математическая теория горения и взрыва / [Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе]. – М. : Наука, 1980. – 186 с.

28. Стаскевич Н. Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н. Л. Стаскевич, Г. Н. Северинец, Д. Я. Вигдорчик. – М. : Наука, 1984. – 214 с.

29. Володарський Є. Т. Особливості застосування. Настанови ISO/IEC43-1:1997 для оцінки професійного рівня випробувальних лабораторій / Є. Т. Володарський, І. О. Харченко, В. І. Згуря // Науковий вісник УкрНДІПБ. – К. : УкрНДІПБ, 2003. – № 2 (8). – С. 15–21.

30. Володарський Є. Т. Достоверность контрольных испытаний и неопределенность измерений / Є.Т. Володарський, І. О. Харченко, В. І. Згуря // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький : 2004. – № 2'2004. – Ч. 1, Т. 1. – С. 90–92.
31. Коцюба А. М. Невизначеність вимірювань / А. М. Коцюба, І. О. Харченко, В. І. Згуря // Стандартизація, сертифікація та якість. – К. : 2004. – № 2'2004. – С. 45–47.
32. Оцінювання придатності методу визначення маси погонного метра напірного пожежного рукава / І. О. Харченко, А. М. Коцюба, С. І. Сопенко [та ін.] // Науковий вісник УкрНДІПБ. – К. : УкрНДІПБ, 2005. – № 1(11). – С. 86–93.
33. Металлургические печи. Теория и расчеты : учебник : в 2-х т. / В. И. Губинский [и др.] под общ. ред. В. И. Тимошпольского. – М. : Наука, 1988. – 351 с.
34. Губинский В. И. Теория пламенных печей / В. И. Губинский, Лу Чжун-У. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
35. Гупало О. В. Методика розрахунку теплової роботи печі безперервної дії з розподіленим підведенням і відведенням газоподібного палива / О. В. Гупало, Н. Є. Василенко, Д. С. Пономаренко // Metallurgическая теплотехника. – 2010. – Вып. 2 (17). – С. 65–71.
36. Ошовский В. В. Использование компьютерных систем конечно-элементного анализа для моделирования гидродинамических процессов / В. В. Ошовский, Д. И. Охрименко, А. Ю. Сысоев // Наукові праці ДонНТУ. – Серія: Хімія і хімічна технологія. – 2010. – Вип. 15 (163). – С. 163–173.
37. Черный С. Г. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе  $k-\epsilon$  моделей / С. Г. Черный, П. А. Шашкин, Ю. А. Грязин // Вычислительные технологи. – 1999. – Том 4, № 2. – С. 74–94.
38. Сохацький А. В. Порівняння нових та відомих методик розв'язку рівнянь Нав'є – Стокса в змінних вихор-функція течії в криволінійній неортогональній системі координат / А. В. Сохацький // Придніпровський науковий вісник. – Дніпропетровськ : Дніпропетровський державний університет. – 1996. – № 4. – С. 20.
39. Сохацький А. В. Неявна факторизована схема апроксимації рівнянь Нав'є – Стокса в змінних вихор-функція течії // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. – Севастополь : Сев. ГТУ, 1996. – С. 51.
40. Заславський Б. Л. Застосування чисельного моделювання для вибору аеродинамічної форми транспортних засобів / Б. Л. Заславський, О. А. Приходько, А. В. Сохацький // Праці 3-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків. – Львів : ЛДУ «Львівська політехніка», 1997. – С. 191–192.
41. Сохацький А. В. Застосування моделі турбулентності для розрахунку обтікання колового циліндру / А. В. Сохацький // Методы дискретных особенностей в задачах аэродинамики, электродинамики и теории дифракции. – К. : Институт математики НАН Украины, 1997. – С. 143–146.
42. Заславський Б. Л. Расчет обтекания кругового цилиндра с использованием  $k-\epsilon$  модели турбулентности / Б. Л. Заславський, О. А. Приходько, А. В. Сохацький // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. – Севастополь : Сев. ГТУ, 1997. – С. 80.

43. Егоров В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности : учебное пособие / В. И. Егоров. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
44. Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision Версия 2.5.4. Руководство пользователя. – М. : ТЕСИС, 2008. – 284 с.
45. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М. : ДМК Пресс, 2006. – С. 240.
46. Anderson John D. (1995) Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications. Science/Engineering/Math. McGraw-Hill Science
47. Patankar Suhas. (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science. Taylor & Francis. ISBN 0-89116-522-3
48. Ansys Release 10, inc. Theory Reference.
49. Shah, Tasneem M. An analysis and comparison of tube natural frequency modes with fluctuating force frequency from the thermal cross-flow fluid in 300 MWe PWR / Shah, Tasneem M.; Sadaf Siddiq, Zafar U. Koreshi / International Journal of Engineering and Technology 9 (9): 201–205.
50. Milarcik E. L An Analysis of the Performance of Residential Smoke Detection Technologies Utilizing the Concept of Relative Time / E. L. Milarcik, S. M. Olenick, R. J. Roby // The National Fire Protection Research Foundation Suppression and Detection Research and Applications Symposium (SUPDET), March, 2007. (2007 Carey award).
51. Olenick S. M. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke / S. M. Olenick, D. J. Carpenter // Journal of Fire Protection Engineering. – 2003. – № 13. – S. 87–110.
52. Снегирёв А. Ю. Моделирование тепломассообмена и горения при пожаре : дисс. д-ра техн. наук : 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» / Александр Юрьевич Снегирёв ; Государственная служба гражданской авиации МТ РФ, Академия гражданской авиации. – СПб., 2004. – 270 с.
53. Химическая гидродинамика : справочное пособие / А. М. Кутепов, А. Д. Полянин, З. Д. Запрянов и др. – М. : Квантум, 1996. – 336 с.
54. Бударин В. А. Аналіз прихованих властивостей системи Нав'є – Стокса / В. А. Бударин // Тез. доп. 6 Мінськ. міжнар. форум, ІТМО. – 2008. Т. 1. – С. 75–76.
55. Методичні вказівки до науково-дослідницької практики з дисципліни «Організація наукових досліджень» (Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень) / І. І. Капцов, О. В. Ромашко, Л. В. Гапонова та ін. – Харків : ХНАМГ, 2009. – 59 с.
56. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М. : Изд-во «Мир», 1975. – 648 с.
57. Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Баркоаский. – М. : Изд-во «Наука», 1965. – 512 с.
58. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. [Чинний від 2007-07-01]. – К. : Держспоживстандарт, 2007. – 26 с.
59. ISO/IEC 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.



60. ISO/IEC Guide 43-1:1997 Proficiency testing by interlaboratory comparisons – Part 1: Development and operation of proficiency testing schemes.
61. ISO 5725-2:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2. Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method.
62. ДСТУ-Н ISO/IEC Guide 46:2003 Порівняльне випробування спожиткової продукції та пов'язаних з нею послуг. Загальні положення. [Чинний від 2003-10-28]. – К. : Держспоживстандарт, 2004. – 3 с.
63. ПМУ 15-89 Інструкція про порядок перевірки точності результатів вимірювань у вимірювальних лабораторіях (наказ Держстандарту України від 12серпня 1999 року за № 99) – С. 26–42.
64. EA 2/09 Policy on the Accreditation of Providers of Proficiency Testing Scemes. – 2000. – 5 с.
65. EA 03/04 Use of proficiency testing as a tool for accreditation in testing. – 2001. – 18 с.
66. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. МДС 21.2-2000 [Введен в действие 2000-01-01]. – М. : Стройиздат, 2000. – 49 с. – (Национальный стандарт РФ).
67. Некора О. В. Розрахунково-експериментальний метод визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних будівельних конструкцій : дис. канд. техн. наук : 21.06.02 «Пожежна безпека» / Ольга Валеріївна Некора ; Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Черкаси, 2008. – 147 с.
68. Поздеев С. В. Методика определения режимов нагрева бетонных образцов, моделирующих состояние элементов строительных конструкций при пожаре / С. В. Поздеев, О. В. Некора, А. В. Поздеев // Проблемы пожарной безопасности. – Х. : АГЗУ, 2006. – Вып. 19. – С. 111–116.
69. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / О. М. Нуянзін, С. В. Поздеев, В. М. Андрієнко [та ін.] // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2013. – № 13. – С. 91–100.
70. Нуянзін О. М. Дослідження впливу конструкції вимірювальної арматури вогневих печей на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість / О. М. Нуянзін, С. В. Поздеев // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2011. – № 9. – С. 99–105.
71. Нуянзін В. М. Вплив кліматичних факторів на вогнестійкість залізобетонних колон : дис. канд. техн. наук : 21.06.02 02 «Пожежна безпека» / Віталій Михайлович Нуянзін ; Держ. інспек. техноген. безпеки України, Укр. НДІ цив. захисту. – К., 2013. – 123 с.
72. Зенков Н. И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара : учеб. [для слуш. вузов по спец. «Инженер противопожарной техники и безопасности»] / Н. И. Зенков. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1974. – 176 с.
73. Романенков И. Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов / И. Г. Романенков, В. Н. Зигерн-Корн. – М. : Стройиздат, 1984. – 240 с.
74. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А. Ф. Милованов. – М. : Стройиздат, 1998. – 304 с.

75. Страхов В. Л. Огнезащита строительных конструкций: современные средства и методы оптимального проектирования / В. Л. Страхов, А. Н. Гаращенко // Строительные материалы. – 2002. – № 6. – С. 2–5.

76. Фомин С. Л. Огнестойкость центрально сжатых железобетонных элементов / С. Л. Фомин, О. А. Стельмах, Джафар Шахер Шахин // Сб. пожарной безопасности. Организационно-техническое обеспечение. – Х.: ХИПБ МВД Украины, 1996. – С. 78–81.

77. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В. М. Ройтман. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.

78. Григорьян Б. Б. Огнестойкость сжатых железобетонных элементов при температурных режимах, близких к реальным: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Борис Бахшиевич Григорьян; Харьковский гос. технический ун-т строительства и архитектуры. – Х., 2001. – 168 с.

79. Фомін С. Л. Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук: 21.06.02 «Пожежна безпека» / С. Л. Фомін; Харківська державна академія залізничного транспорту. – Харків, 1997. – 38 с.

80. Фомин С. Л. Моделирование тепло- и влагопереноса в железобетонных конструкциях при воздействии климатической, технологической и пожарной сред / С. Л. Фомин // Электронное моделирование. – 1999. – Т. 21. – № 4. – С. 28–32.

81. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Б. Бартелеми, Ж. Крюппа; пер. с франц. М. В. Предтеченского. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.

82. Kluz T. The fire resistance of prestressed concrete: concrete and constructional Engineering, 1959. – № 7. – P. 231–241.

83. Домокеев А. Г. Строительные материалы: учеб. [для строит. спец. вузов инж.-пед. профиля] / А. Г. Домокеев. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Высшая школа, 1989. – 495 с.

84. Ахвердов И. Н. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона / И. Н. Ахвердов, А. Е. Смольский, В. В. Скочеляс. – Минск: Изд-во «Наука и техника», 1973. – 232 с.

85. Олимпиев В. Г. Исследование прочностных и деформативных свойств тяжелого силикатного бетона при воздействии высоких температур / В. Г. Олимпиев, Н. И. Зенков // Огнестойкость строительных конструкций: сб. трудов ВНИИПО МВД СССР. – М.: ВНИИПО, 1975. – Вып. 3. – С. 24–36.

86. Lie T. T. Processus du developpement et estimation de l'importance d'une incendie / T. T. Lie // «Rev. techn.». – 1973. – № 133. – P. 30–36.

87. Petterson O. S-E Magnusson, Lorgen Tohr-Fire engineering Design of Stee. Structures, are SBI, 1976. – P. 64–72.

88. Lie T. T. Characteristic temperature curves for various fire severities / T. T. Lie // «Fire Tachnol». – 1974, 10. – № 4. – P. 315–326.

89. Rubini P. SOFIE – Simulation of Fires in Enclosures, V 3.0 Users guide, School of Mechanical Engineering, Granfield University (UK), 2000.

90. Gerhardt H. Design Method of Smoke and Heat exhaust Systems in construction Works / H. Gerhardt // Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli». – 2005. – С. 127–140.
91. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering / B. Sundstrom // Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli». – 2005. – С. 141–150.
92. Krukovsky P. Fire Safety Analysis for new Safe confinement's Building Constructions of Chernobyl NPP / P. Krukovsky // Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli». – 2005. – С. 223–227.
93. Башкирцев М. П. Исследование температурного режима при пожарах в зданиях на моделях / М. П. Башкирцев, П. Н. Романенко, Н. А. Стрельчук // Труды Высшей школы МООП РСФСР. – М. : НИиРИО ВШ МООП РСФСР, 1966. – Вып. 13. – С. 33–53.
94. Климов Ю. А. Современные тенденции развития мирового железобетона / Ю. А. Климов // Матеріали II-ї Всеукр. наук.-техніч. конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону». – К. : НДІБК, 1999. – Вип. 50. – С. 12–18.
95. Law Margaret. Predication of fire resistance. «Fire-Resistance Requirements Build - New Approach. Proc. Symp., London, 1971" London, 1973. – P. 15–29.
96. Ройтман М. Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М. Я. Ройтман. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Стройиздат, 1985. – 596 с.
97. Ройтман В. М. Возможности прогнозирования и регулирования огнестойкости строительных материалов и конструкций на основе кинетического подхода / В. М. Ройтман // Пути повышения огнестойкости строительных материалов и конструкций. – М. : Знание, 1982. – С. 63–67.
98. Милованов А. Ф. Расчет жаростойких железобетонных конструкций / А. Ф. Милованов. – М. : Стройиздат, 1975. – 128 с.
99. Мурашев В. И. Железобетонные конструкции. Общий курс / В. И. Мурашев, Э. В. Сигалов, В. Н. Байков ; под ред. П. Л. Пастернака. – М. : Госстройиздат, 1962. – 658 с.
100. Кошмаров Ю. А. Новые методы расчета огнестойкости и огнезащиты современных зданий и сооружений / Ю. А. Кошмаров // Пожарная безопасность. – 2002. – № 2. – С. 91–98.
101. Метод конечных элементов в механике твердых тел / [А. С. Сахаров, В. М. Кислокий, В. В. Киричевский и др.]; под ред. А. С. Сахарова, И. А. Альтенбаха. – К. : Вища школа ; Лейпциг : ФЭБ Фахбухферлаг, 1982. – 480 с.
102. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1-2 : General rules – Structural fire design, Brussels 2004.

*Наукове видання*

**С. В. Поздєєв, С. О. Сідней, В. М. Гвоздь, О. М. Тищенко,  
О. М. Нуянзін, О. В. Некора, Т. М. Шналь, А. І. Березовський,  
І. В. Рудешко, С. М. Федченко, І. А. Неділько**

Під загальною редакцією  
доктора технічних наук, професора  
**ПОЗДЄЄВА СЕРГІЯ ВАЛЕРІЙОВИЧА**

**ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ  
ПРИ ОЦІНЮВАННІ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТІН**

***МОНОГРАФІЯ***

Підписано до друку 27.08.2021 р.  
Обл.-вид. арк. 3,88. Ум. друк. арк. 6,4.  
ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України  
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034