

С. Д. Щіпець, С. В. Поздєєв, Є. О. Тищенко, В. К. Словінський

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА  
ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТІН**

Черкаси  
2017



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТА КАМ'ЯНИХ СТІН.....	
1.1. Нормування вогнестійкості залізобетонних та кам'яних стін .....	
1.2. Метод вогневих випробувань несучих стін .....	
1.2.1. Конструктивні особливості вогневих печей.....	
1.2.2. Особливості опорно-навантажувальної системи .....	
1.2.3. Критерії настання граничних станів .....	
1.2.4. Контрольно-вимірювальна система.....	
1.2.5. Особливості встановлення та розташування несучих стін у печах.....	
1.2.6. Температурний та силовий режими випробування.....	
1.3. Розрахункові методи оцінки вогнестійкості несучих стін.....	
1.3.1. Спрощені розрахункові методи.....	
1.3.2. Уточнені розрахункові методи.....	
1.3.3 Термомеханічні властивості матеріалів несучих стін.....	
1.3.4 Теплотехнічна задача при розрахунковій оцінці вогнестійкості несучих стін.....	
1.4. Мета і задачі дослідження.....	
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПРАТУРНИХ РОЗПОДІЛІВ У ПЕРЕРІЗАХ СТІНОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ТЕМПЕРАТУРНИМИ ПОКАЗНИКАМИ, ОТРИМАНИМИ ПРИ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАННЯХ.....	
2.1. Чисельне дослідження температурних розподілень у перерізі стінових елементів при вогневих випробуваннях.....	
2.1.1. Математична модель теплопередачі у стінових елементах при їх вогневих випробуваннях.....	
2.1.2. Результати розрахунку температурних розподілів у перерізах стінових елементів.....	
2.2. Обґрунтування методу інтерполяції температурних полів у перерізі стін за результатами вогневих випробувань.....	
2.2.1. Метод інтерполяції температурних полів шляхом розв'язку задачі теплопровідності у стінових елементах під час їх випробувань на вогнестійкість.....	
2.2.2. Номограмний метод інтерполяції температурних полів у стінових елементах під час їх випробувань на вогнестійкість.....	
2.2.3. Адекватність температурних розподілень, отриманих за допомогою апроксимації номограм.....	
РОЗДІЛ 3. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
3.1. Експериментальне обладнання.....	
3.2. Методика виготовлення та формування зразків залізобетонних стін для випробувань.....	
3.2.1. Виготовлення фрагменту залізобетонної стіни-зразку для вогневих випробувань.....	

- 3.2.2. Виготовлення фрагменту стіни-зразку з блоків із легкого бетону для вогневих випробувань.....
- 3.3. Методика вогневих випробувань стінових фрагментів-зразків.....
- 3.3.1. Методика підготовки обладнання та фрагменту залізобетонної стіни-зразка до випробувань.....
- 3.3.2. Методика підготовки обладнання та зразків фрагменту стіни-зразка з блоків із легкого бетону до випробувань.....
- 3.3.3. Методика проведення випробувань.....
- 3.3.4. Методика визначення початкового навантаження на фрагмент стіни-зразок з блоків із легкого бетону.....

#### РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ.....

- 4.1. Результати вогневих випробувань залізобетонних стінових фрагментів-зразків.....
- 4.1.1. Результати попередніх досліджень міцності бетону залізобетонних стінових фрагментів-зразків.....
- 4.1.2. Результати вогневих випробувань залізобетонних стінових-фрагментів-зразків.....
- 4.2. Результати вогневих випробувань стінових фрагментів-зразків з блоків із легкого бетону.....
- 4.3. Інтерполяція температур у перерізі стінових фрагментів за результатами випробувань.....

#### РОЗДІЛ 5. ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТА КАМ'ЯНИХ НЕСУЧИХ СТІН .....

- 5.1. Обґрунтування методу інтерпретації даних стандартних вогневих випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін.....
  - 5.2. Обґрунтування методу ідентифікації коефіцієнту роботи матеріалу стіни за результатами її вогневих випробувань.....
  - 5.3. Обґрунтування методу вирішення міцнісної задачі для оцінки вогнестійкості залізобетонних та кам'яних несучих стін.....
  - 5.4. Алгоритм удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість несучих залізобетонних та кам'яних стін.....
  - 5.5. Оцінка точності результатів оцінки вогнестійкості залізобетонних колон за удосконаленим методом.....
- СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

## ВСТУП

При великій кількості будівель і споруд, зведених із застосуванням новітніх технологій будівництва, а також зношених експлуатованих будівель, необхідно вживати ефективних технічних заходів для забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій відповідно до діючих нормативних документів. Це зумовлює важливість задач щодо забезпечення відповідних нормативних вимог до пожежної безпеки будівель та споруд у тому числі щодо вогнестійкості несучих конструкцій, зокрема несучих стін, адже вони у числі найбільш відповідальних елементів, їх відмова веде до найбільших руйнувань і відповідно найбільших соціально-економічних збитків.

В роботах А.І. Яковлева, В.П. Бушева, В.А. Пчелінцева, В.М. Ройтмана, А.Ф. Мілованова, С.Л. Фоміна, В.Л. Страхова, П.Г. Круковського, С.В. Новака, О.В. Некори, С.В. Поздєєва, Т. Lie, В. Bartelemi, G. Kruppa, T. Harmathy, M. Schäfer, D. Bernhart широко розглянуті методи визначення фактичних меж вогнестійкості несучих стін експериментальним та розрахунковим шляхом.

На даний час існують два підходи до оцінки вогнестійкості несучих будівельних конструкцій, зокрема і несучих стін. Перший підхід заснований на проведенні вогневих випробувань, які відбуваються з використанням зразків, розміри і діючі навантаження яких відповідають або близькі до реальних. Результати випробувань цих зразків поширюються на реальні конструкції без відповідного обґрунтування і при цьому не враховується ймовірна похибка як результат таких умов проведення випробувань.

Другий підхід застосовує розрахункові методи. Як недолік цього підходу можна зазначити те, що в якості початкових даних використовується набір властивостей матеріалів, які можуть істотно відрізнитись у межах відповідного класу.

Для оцінки вогнестійкості залізобетонних і кам'яних несучих стін є перспективним використання експериментально-розрахункових методів. Даний підхід полягає у поєднанні вогневих випробувань і розрахункової інтерпретації їх результатів на основі однієї з відомих математичних моделей напружено-деформованого стану відповідного елемента конструкції. Проведення вогневих випробувань зразків, близьких до реальних елементів конструкцій, забезпечує високу достовірність результатів, а застосування розрахунку надає гнучкість і універсальність цьому підходові при врахуванні реальних умов за режиму роботи несучих стін у складі відповідної структури при термосилової дії пожежі. Даний підхід дозволяє також суттєво зменшити трудомісткість і вартість вогневих випробувань шляхом виключення з випробувальних установок опорно-навантажувального вузла, або суттєвого зменшення його потужності, і зменшення за рахунок цього габаритів випробувальних установок.

# РОЗДІЛ 1

## МЕТОДИ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТА КАМ'ЯНИХ СТІН

### 1.1. Нормування вогнестійкості залізобетонних та кам'яних стін

Залізобетонні та кам'яні стіни відносяться до огорожувальних елементів будівельних конструкцій, які також часто виконують несучу функцію, сприймаючи при цьому основне навантаження у будівлі. В багатьох випадках на стінові елементи покладається важлива функція огороження протипожежних відсіків, що суттєво підвищує їх роль при забезпеченні живучості будівель при пожежі [1 – 41]. Від їх вогнестійкості залежить ризик високих соціально-економічних втрат, оскільки він пов'язаний із обмеженням поширення пожежі у будівлі за рахунок створення протипожежних перешкод, безпекою евакуації людей та майна з приміщень будівель під час пожежі і роботи аварійно-рятувальних підрозділів. Враховуючи весь комплекс показників роботи стінових елементів в умовах пожежі до них висуваються особливі вимоги щодо їх вогнестійкості.

Згідно [1 – 37] основним показником вогнестійкості несучих стін є їхні межі вогнестійкості, що визначається часом (в хвиликах) від початку пожежі до настання втрати несучої здатності (R), теплоізолювальної здатності (I) та цілісності (E), оскільки стіни виконують і несучі і огорожувальні функції у будівлях. Граничний стан втрати несучої здатності стінових елементів пов'язується із втратою стійкості або повної руйнації. Ознакою стану втрати несучої здатності є критичні деформації поздовжнього згину, високі швидкості їх нарощення, або повна деструкція. В залізобетонних стінах ознакою втрати несучої здатності є заголення робочої арматури. Втрата теплоізолювальної здатності визначається за підвищенням температури у приміщенні, суміжному приміщенню із пожежею. Ознакою настання втрати теплоізолювальної здатності є досягнення необігрівальною поверхнею стіни середнього підвищення температури на 140 °С, або підвищення температури в будь-якій точці необігрівальної поверхні стіни на 180 °С. Ознакою настання стану втрати цілісності є утворення у стіні наскрізних тріщин або ушкоджень, що є каналами для проникнення продуктів горіння у суміжне приміщення. Вимоги до вогнестійкості елементів будівельних конструкцій у тому числі і для стінових елементів можуть бути визначені згідно з умовними класами будівель та споруд які називаються ступенями вогнестійкості [21]. У свою чергу ступені вогнестійкості визначаються мірою відповідальності та типом використаних будівельних конструкцій. У табл. 1.1 показані приклади застосованих будівельних конструкцій у залежності від ступеня вогнестійкості [21].

**Конструктивні характеристики будівель залежно від їх ступеня  
вогнестійкості**

Ступінь вогнестій- кості	Конструктивні характеристики
I, II	Будівлі з несучими і захищеними конструкціями з натуральних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону з використанням листових і плиткових негорючих матеріалів.
III	Будівлі з несучими і захищеними конструкціями з натуральних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону.
IIIa	Будівлі переважно з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса - з металевих захищених конструкцій.
IIIб	Будівлі переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – з деревини, підданій вогнезахисній обробці.
IV	Будівлі з несучими і захищеними конструкціями з деревини або інших горючих матеріалів, захищених від дії вогню і високих температур штукатуркою або іншими листовими, плитковими матеріалами.
IVa	Будівлі переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – з металевих незахищених конструкцій.
V	Будівлі з несучих і захищених конструкцій до яких не висуваються вимоги щодо меж вогнестійкості.

Для встановлення відповідності будівель та споруд вимогам нормативних документів, що діють в Україні [21, 22] вводяться показники фактичної і вимагаємої ступені вогнестійкості елементів конструкцій будівлі. Вимагаємий ступінь вогнестійкості будівлі  $B_n$  – це мінімальний ступінь вогнестійкості будівлі для відповідності нею вимогам пожежної безпеки. Необхідний ступінь вогнестійкості будівель визначається галузевими або спеціалізованими нормативними документами [21], і повністю визначає комплекс вимог щодо мінімальних меж вогнестійкості. Мінімальна межа вогнестійкості елементів будівельних конструкцій визначається настанням будь-якого граничного стану.

В Україні в даний час мінімальні межі вогнестійкості встановлюються з урахуванням призначення будівель, поверховості, місткості, категорії виробництва щодо вибухопожежної небезпеки, наявність автоматичних установок пожежогасіння і інших чинників. В табл. 1.2 показані деякі приклади призначення вимагаємої межі вогнестійкості несучих стін різних будівель за їх функціональним призначенням [21].

**Необхідні межі вогнестійкості несучих стін для різних типів будівель**

Ступінь вогнестійкості	Типи будівель	Вимагаєма межа вогнестійкості REI (хв)
I	Виробничі, суспільні, житлові (до 16 поверхів).	150
II	Виробничі, суспільні, житлові (до 16 поверхів).	120
III	Виробничі, суспільні (до 5 поверхів), житлові	120
IIIa	Суспільні, (до 5 поверхів) школи, культурно-видовищні установи (в 1 поверх)	60
IIIб	Суспільні, (до 5 поверхів) школи, культурно-видовищні установи (в 1 поверх)	60
IV	Виробничі, суспільні (до 2 поверхів)	30
IVa	Виробничі, суспільні (в 1 поверх)	30

В останній час галузь нормування вогнестійкості будівельних конструкцій зазнає реформування у напрямку гармонізації з нормами, що є дійсними у державах Євросоюзу [38 – 40]. Згідно з даними нормативними документами вогнестійкість будівельних конструкцій оцінюється за розрахунковою тривалістю пожежі. Розрахункова тривалість пожежі визначається пожежним навантаженням, площею та проємністю приміщень, показниками роботи пожежної автоматики, тощо. Згідно з даними розрахунку мінімально допустима межа вогнестійкості визначається з ряду значень REI: 15; 30; 45; 60; 90; 120; 150; 180; 240; 360.

Перевірка відповідності елементів будівельних конструкцій вимогам щодо вогнестійкості здійснюється порівнянням значення фактичної межі вогнестійкості із значенням вимагаємої мінімальної межі вогнестійкості.

При такому підході мінімальні межі вогнестійкості встановлюються набагато простіше аніж фактичні межі вогнестійкості. Фактичні межі вогнестійкості визначаються складніше, – експериментальним шляхом, у результаті розрахунку, або методами, що поєднують у тій чи іншій мірі експеримент і розрахунок. Згідно з основними нормативними документами, що діють в Україні [21 – 24], перевага при визначенні фактичних меж вогнестійкості несучих стін віддається вогневим випробуванням.

**1.2. Метод вогневих випробувань несучих стін**

Випробування несучих стін на вогнестійкість відбувається у відповідності до стандартів [22 – 23]. Згідно із цими стандартами несуча стіна повинна бути піддана вогневій дії в умовах її навантаження силовими факторами, що повністю відповідають діючому навантаженню згідно із розрахунковою схемою конструкції будівлі. Такі чинники створюються відповідними вузлами випробувальних установок, які поєднують вогневу піч із опорно-навантажувальним пристроєм. На рис. 1.1 показана схема-прототип подібної установки, відповідно до стандартів [22 – 23].



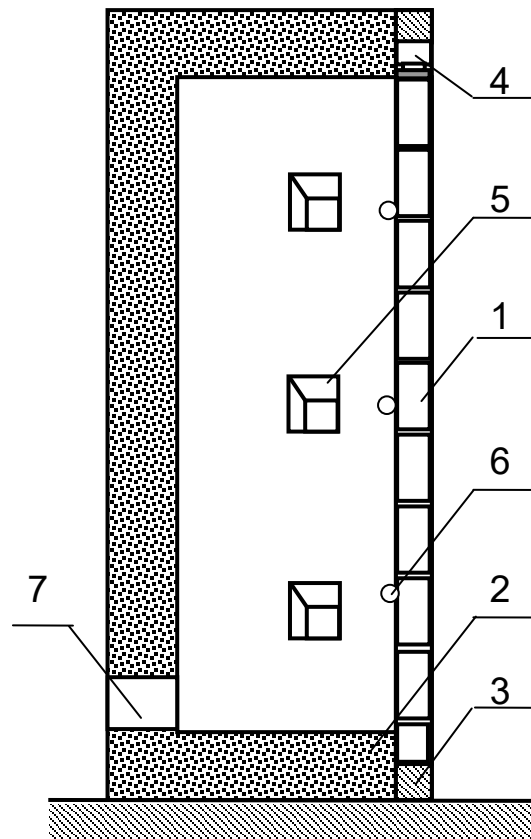


Рис. 1.1. Установка для випробування несучих стін на вогнестійкість:

1 – зразок для випробувань; 2 – огороження печі; 3 – опорно-навантажувальна рама; 4 – гідроциліндр, 5 – форсункові канали; 6 – термопари; 7 – димовідвідний люк.

Система діючих стандартів [22 – 25] формує комплекс вимог щодо конструкції установок для випробувань, параметрів зразків, контрольно-виміральної апаратури, послідовності процедур випробувань та обробки результатів.

**1.2.1. Конструктивні особливості вогневих печей.** Нагрівальні печі мають бути сконструйовані таким чином, щоб забезпечувати односторонній нагрів стінових елементів [22 – 23] та надлишковий тиск. Геометричні параметри випробувальних повинні забезпечувати можливість випробовування зразків, із проектними розмірами відповідних елементів будівельних конструкцій. У разі, коли це неможливо зробити, системою стандартів [22 – 23] передбачено, що мінімальні висота і ширина стінового елемента становить 3000 мм, відповідно мінімальним висоті і ширині вогневої камери печі. Глибина простору печі повинна бути не менше за 0,8 м.

Футеровка печі повинна мати товщину не меншою за 50 мм, а її матеріал повинен забезпечувати достатню термоізоляцію камери, причому теплова інерція при його нагріванні до температури 500 °С повинна задовольняти таку умову:

$$\sqrt{\lambda \rho c} \leq 500 \text{ Вт с}^{1/2} \text{ см}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}, \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$  ;

$\rho$  - густина,  $\text{кг/м}^3$ ;

$c$  - питома теплоємність,  $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$  .

Нагрівальна система повинна: по-перше, включати автоматичну паливно-форсункову систему на рідкому паливі (гасі, дизпаливі); по-друге, мати пальники (форсунки), які синхронно включаються із максимальною різницею у 60 с; по-третє, факели, що формуються форсунками у каналах, не повинні торкатися обігрівальних поверхонь.

Система вимог до печей, що сформована у нормах [22 – 23] має певні недоліки. Немає обґрунтування мінімальних розмірів зразка, що піддається випробуванням. Відсутні чіткі принципи до кількості, розташування пальників, конфігурації вентиляційних опорів для досягнення рівномірного обігріву та обтікання пічними газами стінових елементів, підданих випробуванням. Відсутні критерії для оцінки рівномірності обігріву випробуваних зразків. Немає уніфікованих вимог для способу та пічного обладнання для створення надлишкового тиску.

**1.2.2. Особливості опорно-навантажувальної системи.** Конструкція опорно-навантажувальної системи має забезпечити випробування зразків стінових елементів під навантаженням. Опорно-навантажувальна система складається з опорної рами та гідравлічних домкратів із траверсою. Гідравлічні домкрати тиснуть на траверсу, що приводить до стискування стінового елемента між нею та нижньою перекладаючою рами.

У реальних установках опорно-навантажувальна система не дозволяє здійснити силове навантаження більше за 15 - 30 т/м. Це означає, що більшість несучих стін має бути випробувана із навантаженнями істотно нижчими за навантаження передбачені розрахунковими схемами будівель. Система вимог щодо навантаження, регламентована стандартами [22 – 25] допускає випробування тільки з навантаженнями, що повністю відповідають навантаженням, діючим у конструкціях, або за погодження із замовником без навантаження.

Опорно-навантажувальна система повинна включати у себе засоби, що забезпечують установку зразка в печі для забезпечення рівномірного обігріву і розподілу навантаження, а також прикладання навантаження на зразок відповідно до технічної документації на зразок через сталеві траверси рами. Також означена система включає у себе засоби, що забезпечують захист навантажувального обладнання від нагрівання, наприклад, спеціальні ущільнення, які встановлюють по краю зразків для випробування. Ці засоби повинні забезпечувати ізоляцію країв зразка від стін печі, не повинні впливати на поведінку зразка під час всього часу випробування, забезпечуючи при цьому вільне переміщення зразка вздовж стінок печі без зміни передачі навантаження

від навантажувального обладнання на зразок і без впливу на фіксацію країв зразка.

Опорно-навантажувальна система має відтворювати умови роботи стіни, які визначені у технічній документації на зразок та підтримувати його у межах  $\pm 5\%$  від необхідної величини без зміни його розподілу по зразку протягом усього часу випробування до моменту настання одного з граничних станів.

Навантаження на зразок встановлюють, виходячи з умови створення у розрахункових перерізах зразків напружено-деформованого стану, який відповідає дії нормативних постійних і тимчасових тривалих навантажень, передбачених проектною документацією. При цьому зразок може бути випробуваний тільки при шарнірному спиранні верхнього та нижнього країв стіни. Бокові сторони фрагменту стіни є вільними від механічних в'язів.

Алгоритм визначення еквівалентних навантажень та спосіб спирання зразка у печі, які у найбільшій мірі відтворюють умови роботи стіни відповідно до проектної документації, має надаватися замовником випробувань у технічній документації на зразок.

При аналізі системи нормативних вимог до вогневих випробувань несучих стін можна виділити певні недоліки. Основним недоліком даного комплексу вимог є дозвіл, що надається замовнику визначати умови механічного навантаження несучих стін під час випробувань без чітких вимог до обґрунтування критеріальної бази щодо настання граничних станів. Можна відзначити той факт, що ймовірно настання випадку, коли навантаження і розміри фрагменту разом, або окремо можуть не відповідати реальним навантаженням і розмірам стін. Такі обставини викликають необхідність розробити теоретичні засади врахування дані особливості при інтерпретації результатів випробувань. Також серед недоліків можна відзначити відсутність вимог до способу прикладення навантажень.

Означені недоліки у системі вимог до опорно-навантажувального вузла можуть привести до відсутності контролю за процесами, які сильно впливають на кінцевий результат. При цьому можна отримати дані, які сильно відрізняються від реальних даних.

**1.2.3. Критерії настання граничних станів.** Для несучих стін контролюється настання всіх трьох граничних станів. Настання граничного стану втрати несучої здатності визначається за величиною критичного поздовжнього переміщення та величиною швидкості його наростання.

Граничне значення поздовжнього зміщення у міліметрах навантаженого кінця зразка визначається за формулою [22 – 25]:

$$C = h/100 \quad (1.2)$$

граничне значення швидкості наростання вертикальних деформацій

$$\frac{dC}{dt} = 3 \cdot 10^{-3} h \quad (1.3)$$

де  $h$  - початкова висота зразка, мм.

Граничним станом за ознакою втрати теплоізолюючої здатності [22 – 25] є перевищення середньої температури на необігрівній поверхні зразка над початковою середньою температурою цієї поверхні на 140 °С або перевищення температури в довільній точці необігрівної поверхні зразка над початковою температурою в цій точці на 180 °С.

При випробуваннях стан втрати цілісності контролюється за трьома ознаками [22 – 25]: загоряння або тління зі свіченням ватного тампона, що піднесений до необігріваної поверхні зразка в місця тріщин на відстань від 20 мм до 30 мм протягом проміжку часу не менше ніж 30 с; виникнення тріщини, через яку можна вільно (без додаткових зусиль) ввести в піч щуп діаметром 6 мм і перемістити його вздовж цієї тріщини на відстань не менше 150 мм; виникнення тріщини (або отвору), через яку можна вільно ввести в піч щуп діаметром 25 мм; полум'я на необігріваній поверхні зразка спостерігається протягом проміжку часу не менше ніж 10 с.

**1.2.4. Контрольно-вимірювальна система.** Система контролю та вимірювання контрольних показників в установках для випробувань на вогнестійкість несучих стін складається пристроїв, які за призначенням можна розділити на три основні групи. До першої групи відносяться прилади для вимірювання температури у камері печі та у контрольних зразків, що випробовуються.

Система стандартів [22 – 25] висуває вимоги до пристроїв даної групи стосовно їх розташування та технічних характеристик. Передбачається, що при вимірюванні температури в печі біля досліджуваного стінового елемента, встановлюється не менше ніж 5 термопар на відстані від 90 мм до 110 мм від поверхні зразка. Термопари розміщують рівномірно уздовж висоти зразка попарно, тому, як правило використовують 6 термопар. Відстань від вимірювального спая термопар до стінок печі має бути не менше 200 мм.

Для стінових елементів, які випробовуються без навантаження, необхідно встановити термопари, рівномірно розташовані у напрямках двох осей перерізу зразка посередині його висоти для отримання розподілення значень температури по перерізу. Для стін-зразків також необхідно встановити з кожного боку не менше трьох термопар рівномірно по його висоті на арматурі, яка найбільш наближена до поверхонь зразка.

Для контролю температури на обігрівальних поверхнях зразків при визначенні настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності за середньою температурою поверхні використовуються 5 термопар, чотири з яких мають бути розташовані у геометричних центрах чотирьох однакових прямокутних секцій на які розбивається відповідна поверхня, а п'ята термопара розташовується у геометричному центрі відповідної поверхні стінового елемента. У разі коли стіновий елемент є суттєво неоднорідним, тобто частина неоднорідності на його поверхні має площу більшу за 0,1 м<sup>2</sup>. На кожній з таких неоднорідностей повинна бути встановлена термопара.

За узгодженням з випробувальною лабораторією термопари встановлюють у відповідних місцях під час виготовлення зразка у спеціальних трубках або через спеціальні отвори, які передбачаються в необхідних місцях на зразку.

Згідно зі стандартами [22 – 25] для вимірювання температури у печі можуть застосовуватися термопари з неізольованими проводами або термопари, що покриті захисним кожухом. Захисний кожух термопари має бути видалений (відрізаний і знятий) на довжині не менше 25 мм від вимірювального спаю термопари. На рис. 1.2 показана схема пічної термопари із захисним кожухом. Вимірювальний спай термопари повинен бути звареним.

У залежності від призначення використовується той чи інший тип термопари. Вимоги до технічних характеристик термопар для проведення вимірювань подані у табл. 1.3.

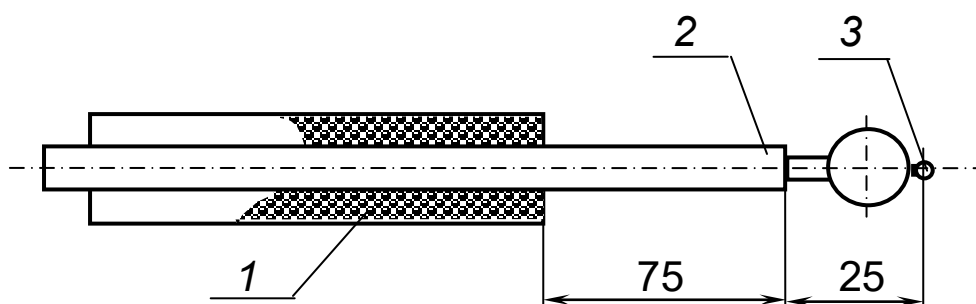


Рис. 1.2. Конструктивна схема термопари для вогневих випробувань:

1 – теплозахисна оболонка; 2 – захисний кожух; 3 – вимірювальний спай.

Таблиця 1.3

#### Технічні параметри термопар

Призначення	Діаметр дроту, мм	Тип термопари	Діапазон вимірювання, °С	Похибка, °С
Вимірювання температури у просторі печі	≤ 1,5	ТХА	0 – 1300	± 15
Вимірювання температури у несучих стінах	≤ 0,75	ТХА	0 – 600	± 10

Вимоги стандартів [22 – 25] щодо розташування і технічних характеристик термопар на поверхні та у внутрішніх шарах несучих стін, що піддаються випробуванням, мають ряд недоліків. До цих недоліків слід віднести наступне: вимога рівномірності розташування термопар у перерізі стін може бути задоволена багатьма способами, що можуть привести до істотної різниці при обробці результатів вимірювань; вимоги щодо розташування термопар на поверхнях стінових елементів не є повністю визначені і дозволяють багатоваріантність, що може позначитися на результатах вимірювань; верхня границя діапазону вимірювання температури у перерізах стінових елементів є низькою; похибка, що закладається при вимірюваннях температури у перерізах зразків є необґрунтовано великою.

Інша група поєднує контрольно-вимірювальні прилади для визначення деформаційно-силових характеристик напруженого стану стінового елементу під час випробування. При випробуваннях з прикладанням механічного навантаження вимірюється сила, що розвивається домкратами, а також поздовжні і поперечні переміщення зразку для випробувань. Для цих вимірювань використовуються прилади, технічні характеристики яких подані у табл. 1.4 [22 – 25].

Таблиця 1.4

**Вимоги до похибки пристроїв для контролю параметрів напружено-деформованого стану несучих стін**

Призначення	Тип приладу	Похибка
Вимірювання навантаження на зразок	Штатний динамометр силового пресу	$\pm 5 \%$
Вимірювання переміщень зразку	Градуйована планка (лінійка), індикатори, лазерні дальноміри	$\pm 2$ мм

Стосовно вимог деформаційно-силових контрольно-вимірювальних приладів можна зазначити декілька недоліків. По-перше, немає вимог щодо визначення точності приладів визначення силових навантажень, по-друге, не зрозуміло яким чином визначається похибка приладів для контролю переміщень стіни, немає чітких вимог, щодо положення точок, в яких визначаються переміщення, немає чітких вимог щодо типу деформацій, що вимірюються.

До останньої групи належать прилади, що призначені для контролю настання граничного стану втрати цілісності. Для контролю настання втрати цілісності використовується ватний тампон розмірами 100×100×20 мм, який виготовляється з м'якої нефарбованої бавовняної вати і не повинен містити ніяких інших волокон. Перед випробуванням тампон має бути висушений при температурі (105 ± 5) °С протягом не менше 30 хв. Маса тампона після сушіння повинна бути від 3 до 4 г.

Стержні щупів для контролю настання втрати цілісності виготовляють із нержавіючої сталі діаметром (6,0±0,1) мм і діаметром (25,0±0,2) мм. Тримачі щупів мають бути виготовлені з теплоізолювального матеріалу і забезпечувати безпечно застосування щупів.

Аналізуючи вимоги стандартів щодо контролю втрати цілісності стіновим елементом можна помітити появу невизначеності при контролюванні цілісності за габаритних розмірів і навантажень стінового елементу, відмінних від реальних розмірів і навантажень;

**1.2.5. Особливості встановлення та розташування несучих стін у печах.** Особливістю вимог стандартів [22 – 25] до граничних умов зразку є допущення можливості випробувань без навантаження, або з навантаженням, що істотно відрізняється від діючого згідно з розрахунковою схемою будівлі, за умови узгодження таких випробувань із замовником. Також допускається проведення

випробувань без контролювання надлишкового тиску, якщо це зумовлено стандартами на методи випробувань на вогнестійкість конструкцій конкретних типів. При цьому настання граничних станів втрати цілісності та несучої здатності фіксується без врахування цих особливостей, а це може помітно відбитися на точності та достовірності величин меж вогнестійкості.

При випробуваннях несучих стін між боковими краями зразка для випробування і випробувальної рами чи опорної конструкції повинен бути зазор розміром від 25 мм до 50 мм, щоб обидва вертикальних краї могли вільно рухатись. Цей проміжок заповнюється нежорстким теплоізолювальним матеріалом, наприклад, мінеральною ватою для забезпечення герметичності без обмеження можливості вільного руху.

До зразка згідно з умовами його роботи у конструкції прикладається відповідне осьове навантаження, або навантаження з ексцентриситетом. Зразок випробовується із двома шарнірними закріпленнями тільки у поздовжньому напрямку.

Також важливим є допущення можливості одночасного випробування декількох стінових елементів у одній печі.

Враховуючі вказані особливості, можна зазначити, що випробування несучих стін без навантаження або з меншим навантаженням повинно бути обґрунтовано, оскільки при такому способі випробувань не враховується величина діючого навантаження, міцність і тип бетону та арматурної сталі, довжина, гнучкість стін та ін. Крім цього, можливість одночасного випробування декількох зразків-стінових елементів також повинна бути обґрунтована, так само як і взаємне розташування цих зразків.

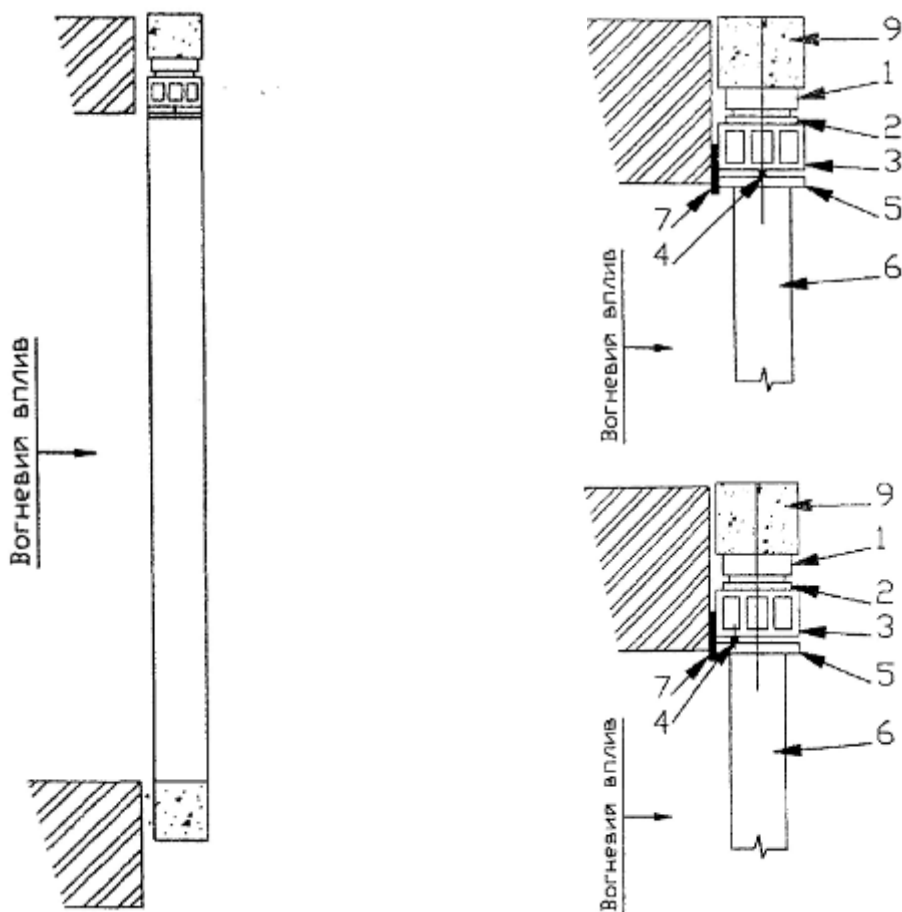


Рис. 1.3. Схема прикладення навантаження без ексцентриситету (а) та з ексцентриситетом (б) до стінового елемента при його випробуванні на вогнестійкість: 1 - гідравлічний домкрат; 2 - динамометр; 3 - траверса; 4 - прут 15×15 мм; 5 - основа; 6 - зразок для випробування; 7 - волокниста ізоляція; 8 - індикатор годинникового типу; 9 - випробувальна рама

**1.2.6. Температурний та силовий режими випробування.** Температурний режим випробування певним чином повинен відтворювати температурні режими реальних пожеж. В якості температурного режиму пожежі розуміється зміна середньооб'ємної температури пожежного середовища, в залежності від тривалості пожежі. Температурні режими реальних пожеж в приміщеннях різних будівель можуть суттєво відрізнятися один від одного [43 – 49]. Приклади температурних режимів пожеж показані на рис. 1.4.

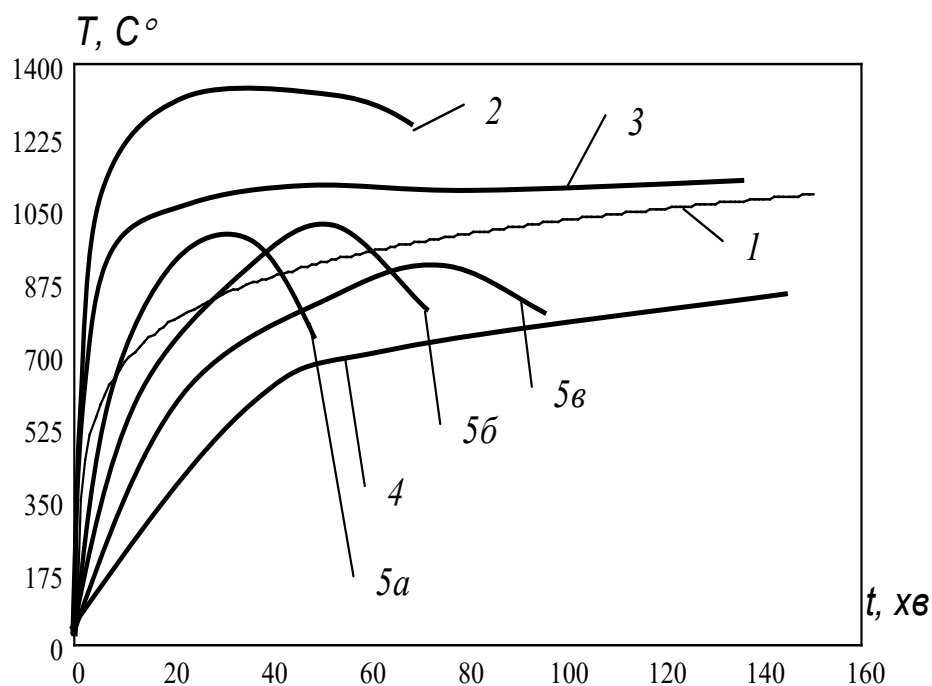


Рис. 1.4 Температурні режими пожеж в приміщеннях будівель та споруд різного призначення. 1 – режим «стандартної» пожежі; 2 – режим пожежі в тунелях; 3 – режим пожежі, характерний для будівель та споруд нафтопереробної та нафтохімічної промисловості; 4 – режим пожежі в підвальних приміщеннях; 5 – режим пожежі в дослідному приміщенні (типу жилого) з зрізною площею отворів  $F_n$  (5а -  $F_n=2\text{м}^2$ ; 5б –  $1,5\text{м}^2$ ; 5в –  $1,0\text{м}^2$ ) при пожежному навантаженні (деревина)  $q=58\text{кг/м}^2$ .



Температурні режими пожеж визначаються кількістю та складом пожежного навантаження; геометричною конфігурацією проємів в огорожувальних конструкціях; характеристиками матеріалів огорожень, тощо. Враховуючи все вище викладене, а також те, що пожежа має стадію розвитку та стадію згасання, температурний режим випробування повинен відповідати певній середній кривій щодо реальних пожеж, у той же час створювати достатньо жорсткі умови для забезпечення визначеного запасу міцності за умов імовірних варіантів протікання пожежі. В табл. 1.5 показані часові залежності температурних режимів вогневих випробувань будівельних конструкцій у залежності від специфіки будівельних об'єктів, де вони використовуються [18 – 20].

Таблиця 1.5

**Температурні режими випробувань будівельних конструкцій  
на вогнестійкість**

Вираз температурної залежності режиму пожежі	Описання типу залежності
$T_p(\tau) = 345 \cdot \lg(8\tau + 1) + T_0$	Стандартна температурна крива пожежі
$T_p(\tau) = 1080[1 - 0,325 \exp(-0,176\tau) - 0,675 \exp(-2,5\tau) + 20]$	«Вуглеводнева» температурна крива пожежі
$T_p(\tau) = 154\tau^{0,25} + 20$ при $0 < \tau \leq 21$ ; $T_p(\tau) = 345 \lg(8(\tau - 20) + 1) + 20$ при $\tau > 21$	Температурна крива «тліючої пожежі»
$T_p(\tau) = 504\tau^{0,141}$ ; $T_p(\tau) = 925 + 150 \ln \tau$ $T_p(\tau) = 20 + 22,2\sqrt{\tau} + 774[1 - \exp(-0,49\sqrt{\tau})]$ $T_p(\tau) = 524 + 10^{0,141 \cdot \lg \tau}$	Різні температурні режими для вогневих випробувань, чинні у різні часи і у різних державах

За відсутності особливих умов, в яких працюють досліджувані конструкції, для випробувань на вогнестійкість використовується стандартна температурна крива пожежі (див. рис. 1.4, крива №1). Означена крива усереднює температурні режими пожеж, які отримані дослідним шляхом і створює достатньо жорсткі умови випробувань завдяки відсутності початкової стадії та стадії згасання. Крім цього, використання такої уніфікованої кривої дозволяє забезпечити відтворюваність експерименту, сформулювати єдині вимоги до випробувального обладнання. Стандартна температурна крива описується формулою:

$$T_p(\tau) = 345 \cdot \lg(8\tau + 1) + T_0 \quad (1.4)$$

де:  $\tau$  – час стандартного вогневого випробування, хв;

$T_0$  – початкова температура середовища, °С;  $T_0 \approx 20^\circ\text{С}$ ;

$T_p(\tau)$  – температура у вогневій камері установки для визначення меж вогнестійкості конструкцій в залежності від часу  $\tau$  стандартного випробування.

Важливою особливістю при створенні температурного режиму випробувань є вимоги стандартів [22 – 25] щодо допустимих відхилень температури у печі від стандартного температурного режиму пожежі. Цікаво те, що похибка є змінною та залежною від часу випробування, залежність показана у вигляді графіку на рис. 1.5.

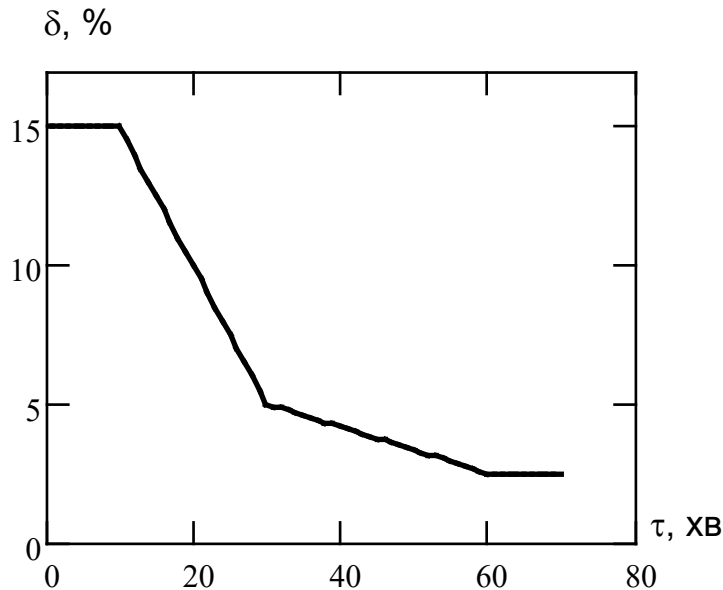


Рис. 1.5. Залежність похибки температурного режиму випробування від часу.

Вимоги до силового режиму випробування згідно з [22 – 25] полягають у наступному: по-перше, у створенні навантаження, що відповідає діючим навантаженням в елементі конструкцій, зокрема сталого та тривалого тимчасового навантаження, а, по-друге, навантаження повинно прикладатися не менше як за 15 хв до початку випробування.

Для створення зазначених умов в реальних установках існують серйозні технічні труднощі [22 – 25], серед яких треба вказати на можливість реалізовувати тільки один тип закріплення стінових елементів, багато реальних установок передбачають прикладання силових навантажень, які є істотно меншими за силові фактори, що діють у реальних структурах. Крім цього, вимоги стандартів зовсім не регламентують спосіб та послідовність навантаження, допустимої похибки при centruванні.

### 1.3. Розрахункові методи оцінки вогнестійкості несучих стін

Альтернативою методам оцінки вогнестійкості несучих стін на основі стандартних вогневих випробувань є розрахункові методи, що застосовуються для проектування вогнестійких будівельних конструкцій [1 – 21, 39 – 59]. Розрахункові методи

застосовують як феноменологічні, так і теоретичні засади щодо поведінки стінових елементів в умовах термосилового впливу пожежі. При застосуванні таких методів не існує обмежень на геометрію, граничні умови та силові фактори даних елементів, які у багатьох випадках з'являються при здійсненні вогневих випробувань.

Базою для розрахункових методів є теоретичні засади поведінки кам'яної кладки, або залізобетону в умовах теплової дії пожежі. Теорія поведінки вказаних матеріалів є достатньо розвинутою і містить широкий клас математичних моделей – від самих простих до складних, які описують всі найбільш значимі ефекти, які при цьому спостерігаються. До таких ефектів слід віднести пластичні деформації, тріщиноутворення, фільтрація пари крізь пори матриці матеріалів, вигорання каркасу матриці матеріалів, зміна міцності, деформативності, умов терморозширення матеріалів, контактні ефекти між арматурою та матрицею і таке інше. Застосовні математичні моделі у тому чи іншому обсязі мають враховувати ці особливості і за їх ієрархією розрахункові методи умовно можна розділити на спрощені та уточнені, а також є окрема група методів які згідно з термінологією системи стандартів [21, 40] називаються альтернативними.

Особливістю розрахункових методів є необхідність на початковому етапі оцінювати температурний розподіл у поперечних перерізах стін з огляду на стандартний температурний режим пожежі, описаний у п. 1.2.5 даної роботи. У спрощених методах такий розподіл визначається за спеціальними номограмами в уточнених методах вирішується задача теплопровідності у той чи іншій постановці. Нижче подані короткі характеристики розрахункових методів, що застосовуються для оцінки вогнестійкості несучих стін.

**1.3.1. Спрощені розрахункові методи.** До спрощених розрахункових методів відносяться табличний метод, метод ізотерм, зонний метод. Дані методи засновані на застосуванні номограмного методу вирішення теплової задачі.

Найбільш простим є табличний метод, який заснований на оцінці межі вогнестійкості стін за спеціальним таблицями, приклад якої наведений у табл. 1.6.

Таблиця 1.6

**Типовий вигляд таблиць для оцінки вогнестійкості несучих кам'яних стін**

Матеріал стіни Рівень навантаження	Мінімальна товщина стіни (мм) $t_F$ по класифікації вогнестійкості R за час $t_{f,d}$ (хвилини)									
	15	20	30	45	60	90	120	180	240	360
Вид каменів, будівельного розчину, групування каменів, густина Рівень навантаження $\alpha \leq 1,0$ та $\alpha \leq 0,6$	Товщина стіни $t_F$									

В якості початкових параметрів тут використовуються характеристики матеріалів (густина, міцність, тип кладки) та рівень навантаження на стіну, який визначається за відношення розрахункового напруження до опору матеріалу каменів.

Табличний метод найбільш застосовний для оцінки вогнестійкості кам'яних стін без армування.

Для несучих стін із залізобетону та армованої кам'яної кладки застосовується метод ізотерм та зональний метод.

Метод ізотерм [40] полягає у обмеженні області поперечного перерізу стіни ізотермою 500 °С. Вважається, що матеріал, нагрітий до температури більше за 500 °С, втрачає свою жорсткість та виключається з розрахункової схеми. Інша частина поперечного перерізу зберігає свої міцнісні та деформативні властивості на рівні ненагрітих шарів. Тому розрахунок стіни відбувається за методиками для розрахунку за нормальних температур із врахуванням поточної геометричної конфігурації перерізу. При цьому рекомендується враховувати опір арматури, що знаходиться поза зоною температур нижчих за критичну, але із врахуванням зміни їх міцності за умови використання відповідних коефіцієнтів роботи.

При обчисленні розрахункового поперечного перерізу розраховується товщина пошкодженого бетону  $a_{500}$  за ізотерми 500 °С, помножена на коефіцієнт  $k$ . Таким чином при розрахунку приведенного перерізу колон та стін необхідно використовувати формулу (1.5).

$$a_z = k a_{z,500} \quad (1.5)$$

Коефіцієнт  $k$  враховується для перетворення від 500 °С до 460 °С. Рекомендованим [40] є значення 1,1 для класу 1 та 1,3 для класу 2. Для класу 3 рекомендуються більш точні методи.

Більш точним, але більш трудомістким, вважається зональний метод [40], який передбачає поділ поперечного перерізу стіни на декілька зон.

Поперечний переріз ділиться на декілька ( $n \geq 3$ ) паралельних зон однакової товщини, де враховується середня температура, відповідний середній опір на стиск та модуль пружності (якщо застосовується) кожної зони.

Пошкоджений під час пожежі поперечний переріз представляється приведеним поперечним перерізом, який не включає товщину пошкодженої зони  $a_z$  обігрівних поверхонь. Приведення поперечного перерізу базується на визначенні товщині  $a_z$  пошкодженої зони обігрівної поверхні (див. рис. 1.5).

Товщина пошкодженої зони визначається за формулою [40]:

$$a_{z1} = w \left[ 1 - \left( \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right]. \quad (1.6)$$

де  $w$  – половина повної ширини поперечного перерізу,  
 $k_{c,m}$  - середній коефіцієнт зниження міцності бетону для всіх зон,  
 $k_c(\theta_M)$  - коефіцієнт зниження міцності бетону на стиск.

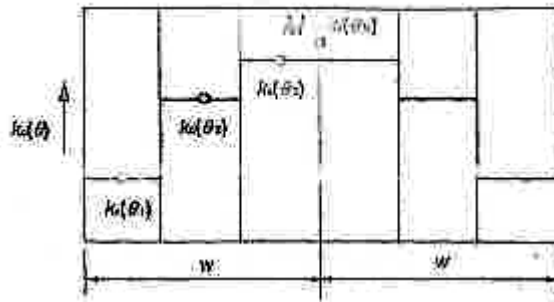


Рис. 1.6. Зниження міцності та приведення поперечного перерізу для стіни з використанням зонального методу.

Середній коефіцієнт зниження опору на стиск для визначеної частини, включаючи коефіцієнт  $(1 - 0,2/n)$ , що враховує при розрахунку зміну температури кожної зони, визначається за формулою (1.6).

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n)}{m} \sum_{i=1}^m k_c(\theta_i), \quad (1.7)$$

де  $n$  – кількість паралельних зон в ширині  $w$ ;

$w$  – половина повної ширини;

$m$  – повна кількість зон.

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 ( $\gamma_{M,fi}$ ).

Зональний метод та метод ізотерм використовують для визначення критичних переміщень або критичних зусиль для оцінки настання граничного стану втрати несучої здатності методики та властивості матеріалів за нормальних умов їх роботи.

**1.3.2. Уточнені розрахункові методи.** Уточнені розрахункові методи засновані на математичних моделях напружено-деформованого стану, які враховують перш за все нелінійну поведінку матеріалів, що викликається їх пластичними деформаціями і викликаними ними великими значеннями глобальних переміщень стінових елементів [80 – 81, 104 – 106]. Для таких задач найбільш за все підходять деформаційні моделі або моделі, що використовують повну систему рівнянь пружно-пластичного опору.

Для врахування пластичної деформації використовуються альтернативні уточнені методи, засновані на деформаційних моделях. У загальному випадку деформаційні моделі використовують рівняння рівноваги, які складаються для найбільш навантаженого перерізу стінового елемента з огляду на гіпотезу плоских перерізів. У загальному вигляді така система рівнянь рівноваги записується у вигляді [45 – 61]:

$$\begin{cases} \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} Y_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} Y_{sj} = M_T \\ \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} = N_T \end{cases}, \quad (1.8)$$

де  $M_T, N_T$  – зовнішні головні момент і поздовжня сила відповідно,  
 $A_{bi}, Y_{bi}, \sigma_{bi}$  — площа, координати центру тяжіння  $i$ -ї ділянки бетону і напруження на рівні його центру тяжіння;

$A_{sj}, Y_{sj}, \sigma_{sj}$  — площа, координати центру тяжіння  $i$ -го стержня арматури і напруження у ньому.

Напруження у ділянках кам'яних блоків, бетону і арматурної сталі визначаються з використанням діаграм деформування як функції крайових деформацій та кривизни стінових елементів за виразами [45 – 61]:

$$\sigma_{bi} = f_1(\varepsilon_{bi}), \sigma_{sj} = f_2(\varepsilon_{sj}), \varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{bi}, \varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{sj}, \quad (1.9)$$

де  $\varepsilon_0$  – відносна деформація крайової точки перерізу у поперечному напрямку;  
 $1/r$  – кривизна стінового елемента.

Такі моделі дозволяють врахувати пластичні деформації елементів і не розглядає параметрів конкретного напружено-деформованого стану стіни. Це є дуже зручним, оскільки за допомогою відносно простих обчислювальних алгоритмів дозволяє оцінити межу вогнестійкості і автоматизувати даний розрахунок, а з іншого боку унаслідок відходу від безпосереднього розглядання параметрів напружено-деформованого стану при використанні непрямого критерію «несуча здатність», який не може бути визначений з прямих спостережень, закладається певна похибка у результати оцінки вогнестійкості за зазначеним розрахунковим методом.

Прикладом застосування таких математичних моделей може служити результати, отримані у роботах [62]. Для силікатобетонної стіни з поздовжньою арматурою, схема якої подана на рис. 1.6 була використана формула (1.10) для визначення несучої здатності.

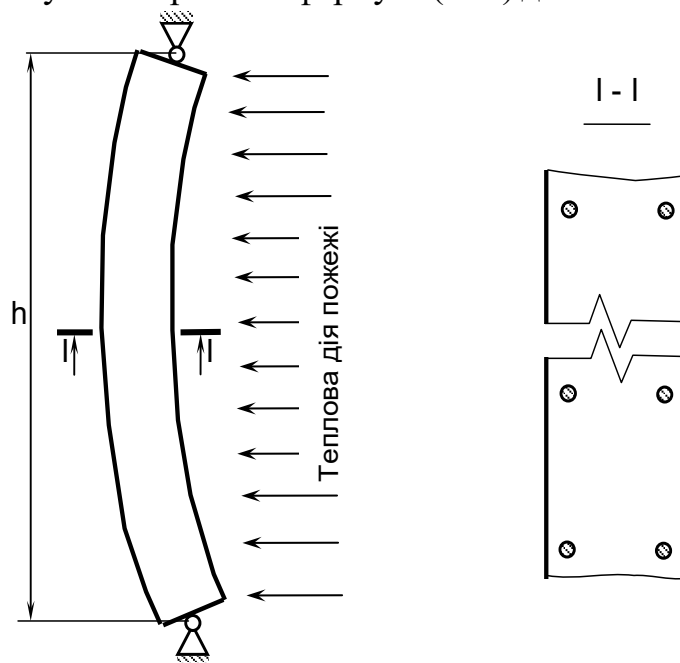


Рис. 1.7. Розрахункова схема силікатобетонної армованої стіни

$$N_{p,t} = f_{c,T} \Delta x^2 e \sum x_i \gamma_{c,t}^i + f_{s,T} \gamma_{s,t} e A'_s x_s, \quad (1.10)$$

де  $e = e_0 + u_t$  – ексцентриситет навантаження. Тут  $e_0$  – початковий ексцентриситет навантаження;

$u_T = 0,82 \cdot 8^{-1} \varepsilon_T \cdot h^2 \cdot b_T$  – температурний прогин стіни;

$h$  – висота стіни;

$b_T$  – корисна висота позацентрово стиснутого перерізу

$\varepsilon_T$  – сумарна відносна деформація стиснутого силікатобетону;

$f_{c,T}$  – межа пропорційності сталі,

$f_{s,T}$  – межа міцності сталі

$\gamma_{c,T}$  – коефіцієнт роботи бетону

$x_i$ , де  $x_s$  – відстані шару силікатобетону і арматурного стержня до центральної осі;

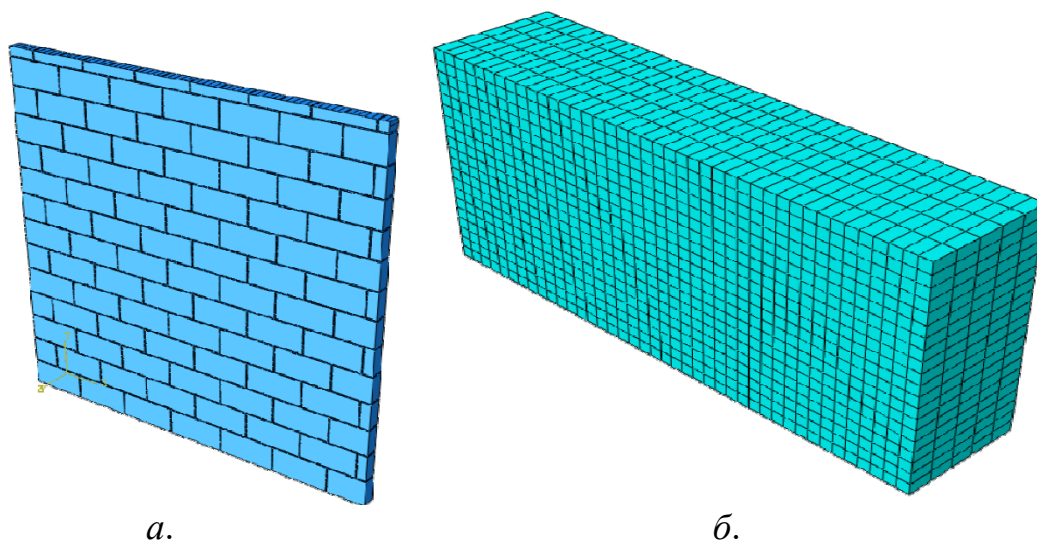
$A'_s$  – площа перерізу стиснутої арматури, що знаходиться біля обігрівальної поверхні

Таким чином, застосувавши цю деформаційну модель визначається несуча здатність залізобетонних та армокам'яних стін.

Інший розрахунковий підхід полягає у тому, що стінові елементи розглядаються як масивні елементи із використанням систем диференціальних рівнянь пружнопластично деформованого тіла. Внаслідок того, що з фізичної точки зору дана задача є термопружнопластичною задачею для твердих тіл складної конфігурації, для її вирішення притягуються чисельні методи, засновані на сітковій дискретизації розрахункових областей. Чисельна реалізація може проводитися за допомогою спеціальних або універсальних комп'ютерних систем. Відомі роботи [31 – 34], в яких означені методи успішно застосовуються для визначення ФМВ стиснутих елементів залізобетонних конструкцій. Наприклад у фундаментальній роботі, що присвячена цій проблемі, був розвинений підхід, який повністю встановив алгоритми використання цих методів на основі застосування для чисельної реалізації цієї задачі методу кінцевих елементів.

Прикладом такого підходу може служити результати, отримані у роботі [33], де були розглянуті математичні моделі стінових елементів, виконаних із силікатних блоків за допомогою застосування комерційної кінцевоелементної комп'ютерної системи ABAQUS.

На рис. 1.8 показана схема та загальний вигляд зразка кладки з силікатобетонних блоків



а.

б.

Рис. 1.8. Загальний вигляд стіни із силікатних блоків (а) та кінцевоелементна схема силікатного блоку (б).

На рис. 1.9 показані спеціальні кінцеві елементи, що моделюють будівельний розчин кладки з силікатних блоків.

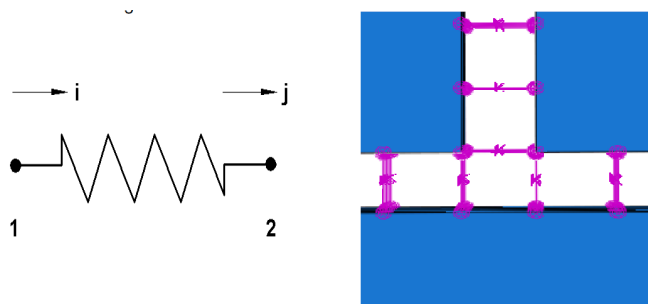


Рис. 1.9. Спеціальні кінцеві елементи, що моделюють будівельний розчин кладки з силікатних блоків.

На рис.1.10 показані граничні умови зразка силікатоблочної кладки

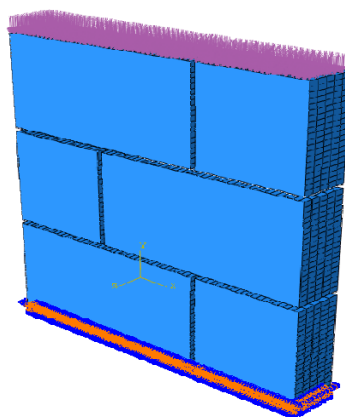


Рис.1.10. Граничні умови зразка силікатоблочної кладки.

Після проведення розрахунку були отримані результати, які подані у вигляді графіку на рис. 1.11.



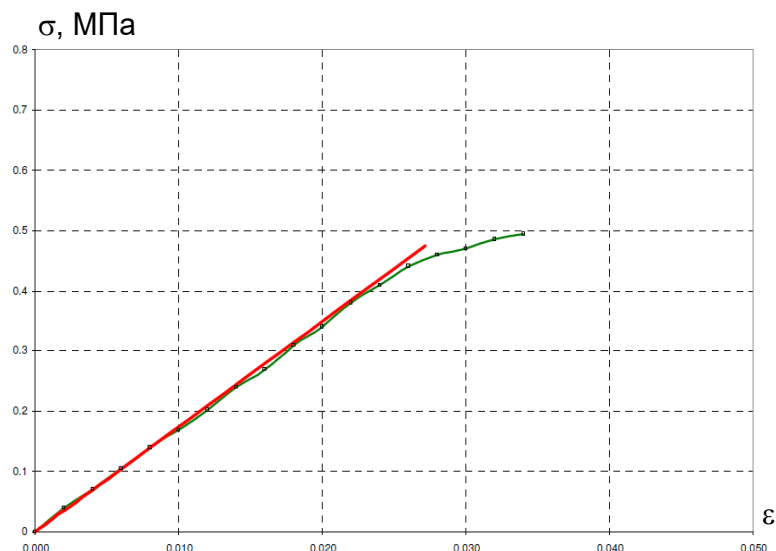


Рис. 1.11. Залежність напружень від деформації зразка кладки, що нагрітий до температури 800 °С

На графіку рис. 1.11 червона лінія відповідає розрахунковим даним, а синя експериментальним. Видно, що застосування методу кінцевих елементів дає точні результати.

**1.3.3 Термомеханічні властивості матеріалів несучих стін.** Уточнені розрахункові методи потребують використання математичних залежностей, які описують пружно-пластичні властивості матеріалів несучих стін, а також залежності температурних деформацій.

Для бетону і арматури при розрахунку застосовуються різні типи діаграм «напруження – деформація» із різними типами нелінійної ділянки [40]. Це може бути як діаграми типу діаграм Прандтля із горизонтальною ділянкою непружних деформацій [41], так і діаграми із спадними гілками [40]. На рис. 1.12 подані типові діаграми для бетону і арматурної сталі.

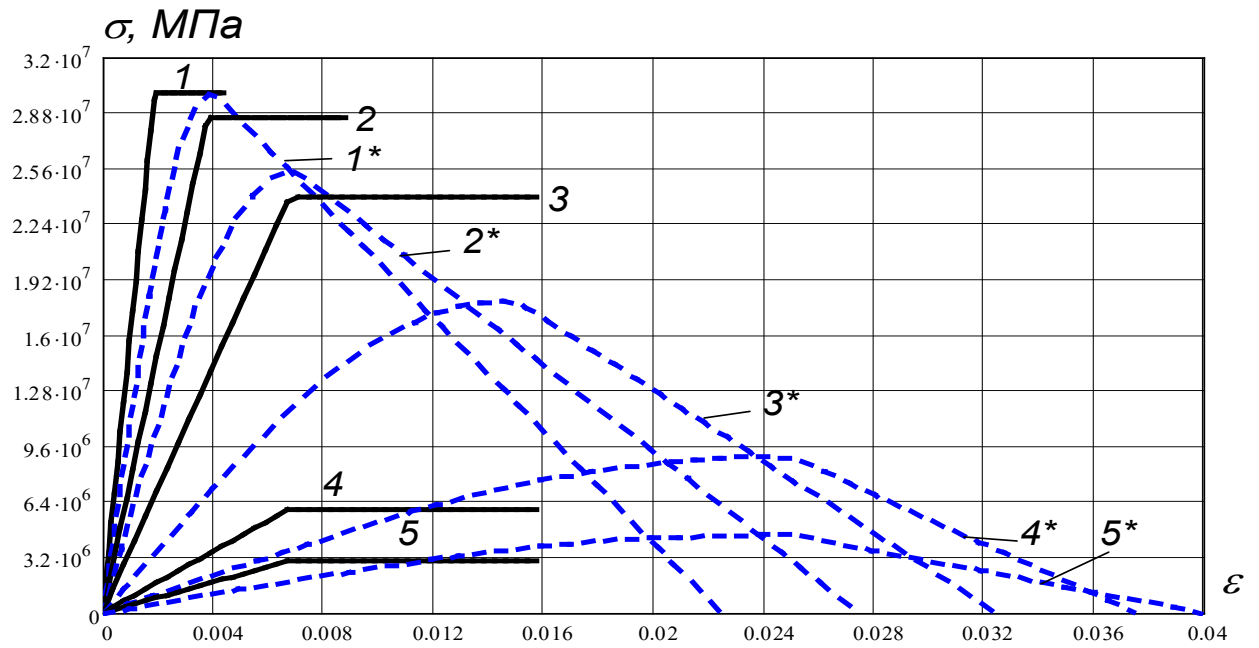


Рис. 1.12. Діаграми деформації бетону згідно із СТО 36554501-006-2006 [41] та EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2\* [40] при різних температурах нагріву для бетону класу В30:  
 1 – 100 °С, 2 – 300 °С, 3 – 500 °С, 4 – 700 °С, 6 – 800 °С,

На рис. 1.13 подані діаграми деформування для арматурної сталі.

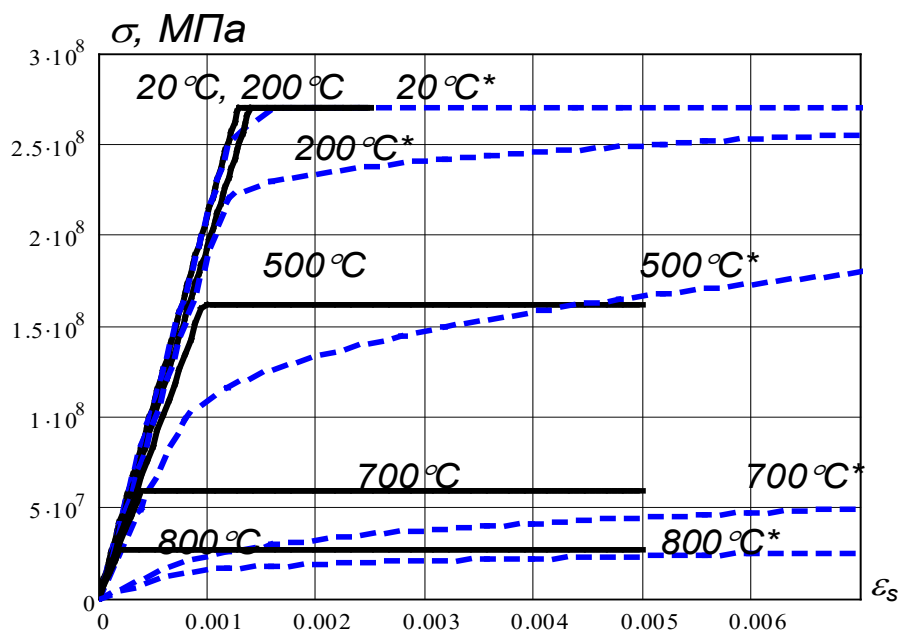


Рис. 1.13. Діаграми деформування відповідно до СТО 36554501-006-2006 [41] та EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2\* [40] при різних температурах нагріву для арматурної сталі класу міцності А240С.

На рис 1.14 показані залежності коефіцієнту температурного розширення і коефіцієнту температурної усадки бетону згідно з рекомендаціями [41].

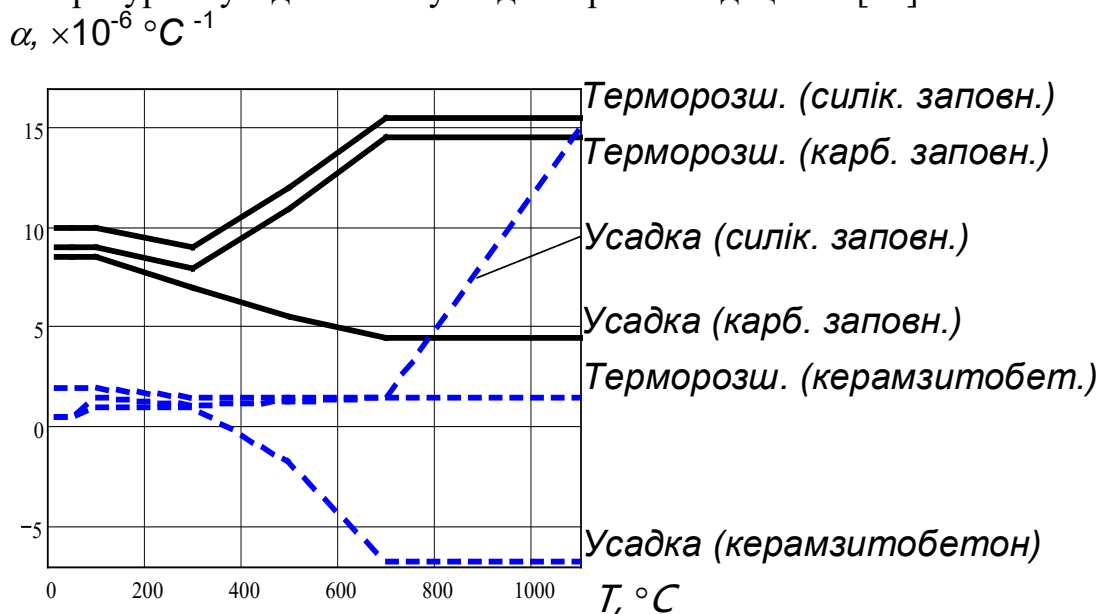


Рис. 1.14. Залежності температурних деформацій бетону згідно із СТО 36554501-006-2006 [41].

Нормативні документи [40, 41] рекомендують використовувати для розрахунків узагальнену залежність температурної деформації для всіх типів бетонів. На рис. 1.15 показані залежності згідно з [40, 41].

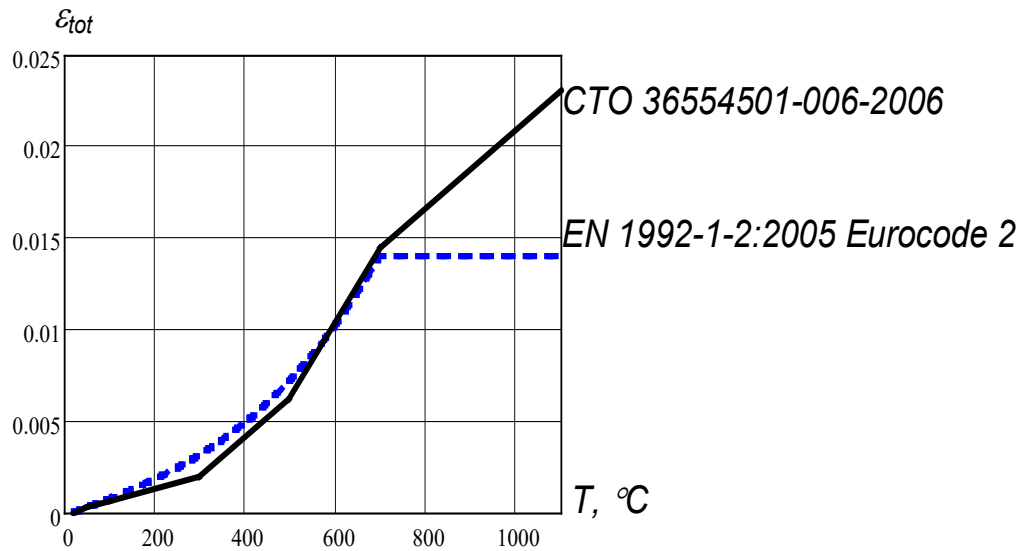


Рис. 1.15. Залежності температурних деформацій важкого бетону на гранітному заповнювачі згідно із СТО 36554501-006-2006 [41] та EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2\* [40].

Також важливою особливістю є температурне розширення арматурної сталі. Температурне розширення арматурної сталі описується діаграмами термозширення, які подані на рис. 1.16.

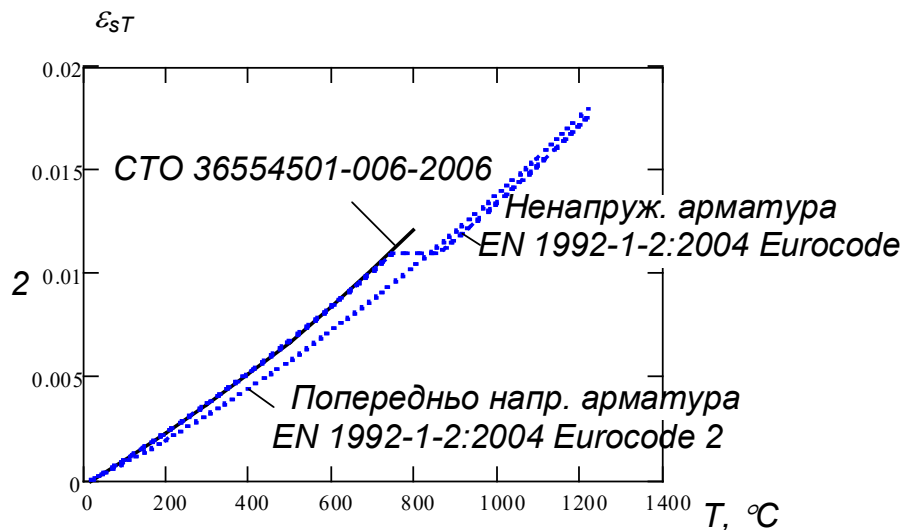
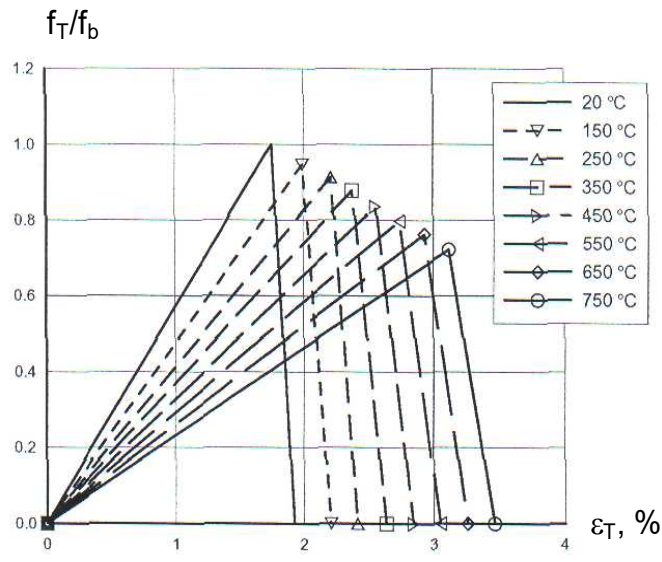
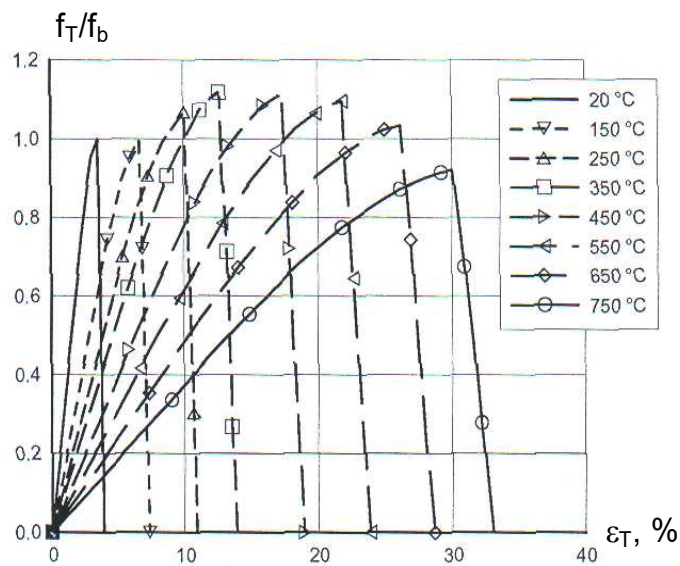


Рис. 1.16. Діаграми температурних деформацій арматурної сталі відповідно до СТО 36554501-006-2006 [41] та EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2\* [40].

На рис. 1.17 подані діаграми деформації при різних температурах для двох основних типів штучних каменів, які використовуються при розрахунках вогнестійкості кам'яних стін.



а.



б.

Рис. 1.17. Діаграми деформації згідно з EN 1996-1-2:2005 Eurocode 6 [60] при різних температурах нагріву для керамічної (а) та силікатної (б) цегли.

**1.3.4 Теплотехнічна задача при розрахунковій оцінці вогнестійкості несучих стін.** Для розв'язку теплотехнічної задачі найбільш поширеним є підхід коли теплофізичні характеристики матеріалів несучих стін є температурними залежностями і комплексно описують всі складні фізико-хімічні процеси, що відбуваються у даних матеріалах при їх нагріванні. Матеріали несучих стін в основному мають пористий каркас із певним вмістом води [1 – 20, 43 – 58]. Сам пористий каркас має гідрокристалічну будову. Тому процес нагріву супроводжується випаровуванням, конденсацією та фільтрацією води у рідкому та газоподібному стані. В такому разі теплофізичні характеристики не мають прямого фізичного змісту і називаються ефективними. Але такий підхід дає достатньо точні результати і набув широкого поширення. В цьому випадку рівняння теплопровідності називається квазілінійним [1 – 20, 31 – 35, 43 – 58] записується у вигляді:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T) \quad (1.11)$$

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

В армованих стінах, зважаючи на велику різницю у коефіцієнтах теплопровідності (майже 3 порядки) враховується теплопередача тільки у відповідні бетонній або цегляній матриці, тому розглядаються відповідні теплофізичні характеристики. На рис. 1.18 та рис. 1.19 подані теплофізичні характеристики бетону.

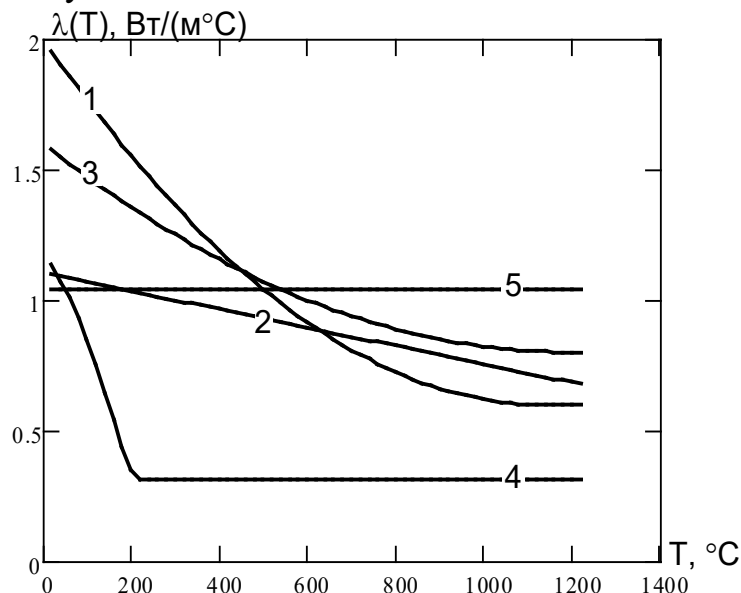


Рис. 1.18. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності:

1 – за рекомендаціями Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2005 [40]; 2 - за рекомендаціями СТО 36554501-006-2006[41]; 3 – згідно з даними роботи Т.Т. Ліє [32]; 4 – згідно з даними роботи [45]; 5 - усереднені дані

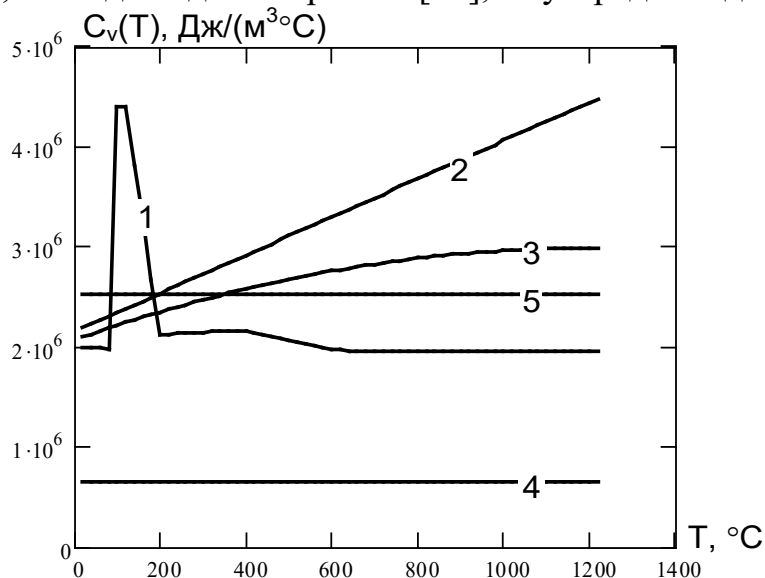


Рис. 1.19. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності:

1 – за рекомендаціями Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2005 [40]; 2 - за рекомендаціями СТО 36554501-006-2006[41]; 3 – згідно з даними роботи Т.Т. Ліє [32]; 4 – згідно з даними роботи [45]; 5 - усереднені дані

На рис. 1.20 подані теплофізичні характеристики кладки з керамічної та силікатної цегли [60].

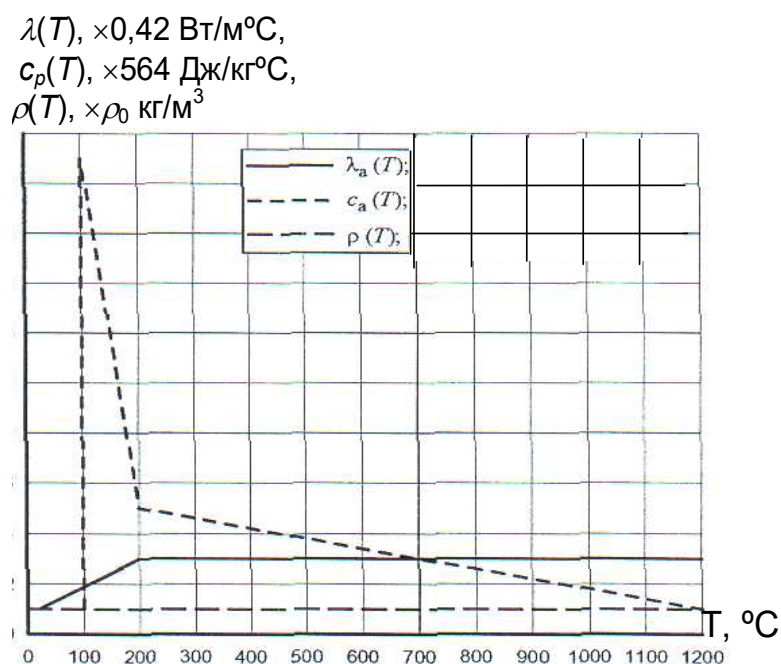


Рис. 1.20. Температурні залежності теплофізичних характеристик кладки з керамічної цегли:

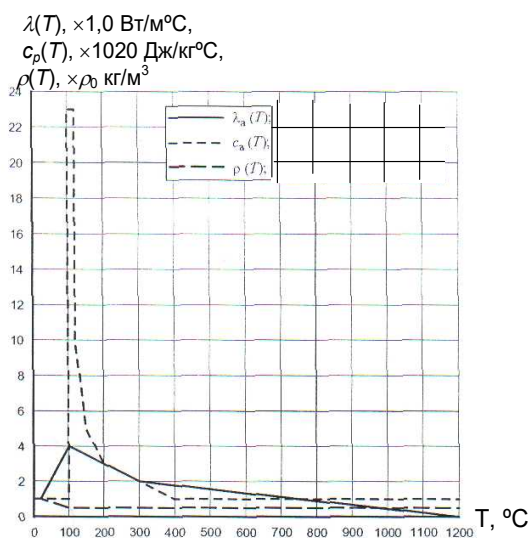


Рис. 1.21. Температурні залежності теплофізичних характеристик кладки з силікатної цегли:

Для розв'язку рівняння теплопровідності (1.11) використовуються граничні умови III роду [1 – 20, 31 – 35, 43 – 58]:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_P - T_W) \quad (1.12)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·град);

$T_P, T_W$  – відповідно температури пожежного середовища і поверхні стіни, °С;

$r$  – поточна просторова координата.

Коефіцієнт теплообміну враховує дію конвекції та інфрачервоного випромінювання і визначається за формулою [1 – 20, 43 – 58]:

$$\alpha = \alpha_B + \alpha_K$$

(1.13)

де  $\alpha_B$  – коефіцієнт теплообміну від випромінювання;  
 $\alpha_K$  – коефіцієнт теплообміну конвекцією.



## РОЗДІЛ 2

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПРАТУРНИХ РОЗПОДІЛІВ У ПЕРЕРІЗАХ СТІНОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ТЕМПЕРАТУРНИМИ ПОКАЗНИКАМИ, ОТРИМАНИМИ ПРИ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАННЯХ

#### 2.1. Чисельне дослідження температурних розподілів у перерізі стінових елементів при вогневих випробуваннях

**2.1.1. Математична модель теплопередачі у стінових елементах при їх вогневих випробуваннях.** Для вивчення розподілів температури по перерізу несучих стін при вогневих випробуваннях нами була використана розрахункова методика, заснована на розв'язку рівняння (1.11) із граничними умовами III роду (1.12). Крайова задача при цьому була поставлена з використанням розрахункової схеми, яка подана на рис. 2.1.

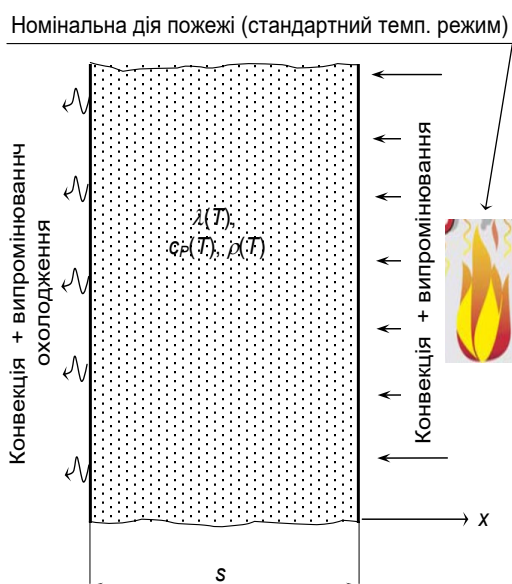


Рис. 2.1. Розрахункова схема моделі теплопередачі при нагріві стінового елемента при вогневих випробуваннях.

Математична модель теплопередачі у цьому випадку добре описана у роботах [1 – 20, 31 – 35, 43 – 58]. При цьому використовується рівняння теплопровідності у такому вигляді:

$$Cv(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2.1)$$

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

Вираз (1.11), який відповідає ГУ III роду на обігрівній поверхні записується у вигляді:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b} = \alpha (T_p - T_w). \quad (2.2)$$

На не обігрівній поверхні стіни вираз (1.11) ГУ III роду записується у вигляді:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (293 - T_n), \quad (2.3)$$

де  $\alpha$ ,  $\alpha_k$  – коефіцієнти теплообміну на обігрівній та не обігрівній поверхні відповідно, що визначається за формулою (1.13).

Згідно рекомендаціям [41] конвективну і радіаційну складові коефіцієнту теплообміну можна визначити з виразів:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) - \text{поверхня, що обігривається;} \\ \alpha_k &= 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) - \text{поверхня, що не обігривається;} \\ \alpha_p &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_W^4 - T_P^4}{T_W - T_P} \end{aligned} \quad (2.4)$$

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

Початкова температура матеріалу стіни та оточуючого середовища  $T_0 = 293 \text{ К}$ .

Температура пожежі визначається за формулою (1.4), яка виражає стандартний температурний режим пожежі.

Для розв'язку прямої задачі нестационарної теплопровідності була застосована підстановка Гудмена [85]:

$$H = \int_0^T C_v(T) dT, \quad (2.5)$$

Рівняння теплопровідності записується у лінеаризованому вигляді:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k(H(T)) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right], \quad (2.6)$$

де  $k(H(T)) = \lambda(H(T))/C_v(H(T))$ .

Алгоритм розв'язку рівняння (2.6) добре описаний у роботі [83 – 85]. Кінцево-різницева апроксимація рівняння була проведена в явній формі із застосуванням інтегро-інтерполяційного методу [85] у вигляді:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{H_{k+1,i} - H_{k,i}}{\Delta t}, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(H(T)) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right] = \frac{1}{\Delta x^2} (aH_{k,i-1} - (a+b)H_{k,i} + bH_{k,i+1}),$$

где

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{\Delta x} \int_{i-\frac{1}{2}}^{i-\frac{1}{2}+\Delta x} \frac{dx}{k(H(T))} = \frac{(k[H(T_{i-1})] + k[H(T_i)])\Delta x}{\Delta x \cdot k[H(T_{i-1})]k[H(T_i)]}, \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{\Delta x} \int_{i+\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}-\Delta x} \frac{dx}{k(H(T))} = \frac{(k[H(T_{i-1})] + k[H(T_i)])\Delta x}{\Delta x \cdot k[H(T_{i-1})]k[H(T_i)]}.$$

Враховуючи умову збіжності, були вибрані часовий і просторовий кроки, рівні  $\Delta t = 15$  с,  $\Delta x = 0,005$  м. Після кожного циклу обчислень за явними рекурентними формулами розв'язувалося квадратне рівняння, яке утворювалося при інтегруванні за формулою (2.5) кусочно-лінійних залежностей теплоємності, які визначаються за рис. 1.18 – рис. 1.20.

Для дослідження прогріву несучих стін під час їх вогневих випробувань були розглянуті різні товщини та різні матеріали, які подані у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Параметри несучих стін для вивчення їх прогріву під час вогневих випробувань**

Матеріал стіни	Товщина, мм
Суцільна стіна із керамічної цегли густиною $\rho = 1000$ кг/м <sup>3</sup>	100
	200
	280
Суцільна стіна із силікатної цегли густиною $\rho = 1800$ кг/м <sup>3</sup>	100
	200
	280
Суцільна стіна із блоків з бетону на легкому заповнювачі густиною $\rho = 800$ кг/м <sup>3</sup>	100
	200
	280
Суцільна стіна з бетону на гранітному заповнювачі густиною $\rho = 2300$ кг/м <sup>3</sup>	100
	200
	280

**2.1.2. Результати розрахунку температурних розподілів у перерізах стінових елементів.** Використовуючи формули (2.5) – (2.8) були проведені обчислення, у результаті яких отримані температурні розподіли у стінових елементах, які були наведені у табл. 2.1.

На рис. 2.2 подані температурні режими прогріву внутрішніх шарів стінових елементів. Дані на вказаних рисунках показують, що використана математична модель теплопередачі дозволяє врахувати випаровування вологи та рух водяної пари, що міститься у порах матеріалу, оскільки графіки мають горизонтальну ділянку у області 100 °С.

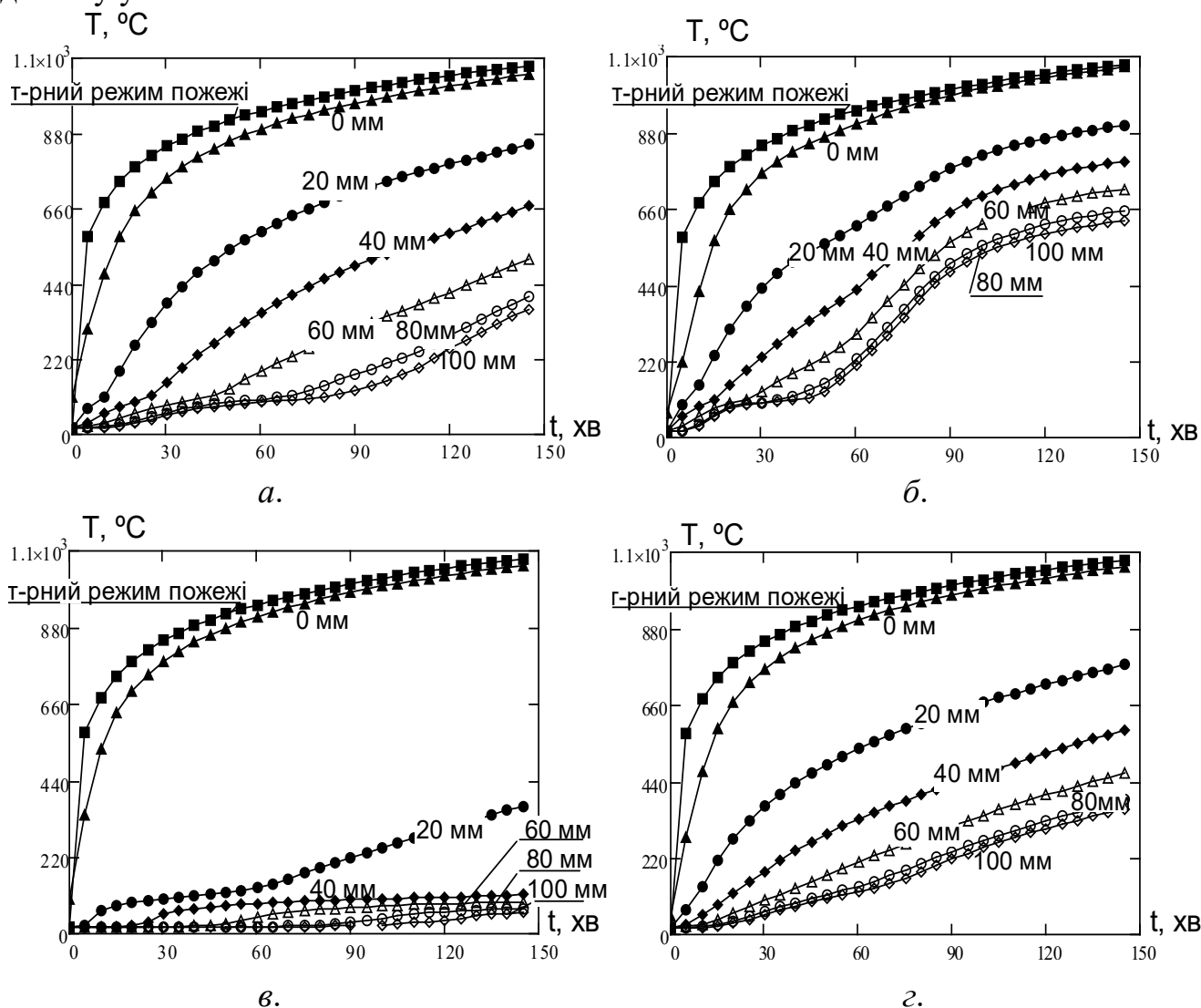


Рис. 2.2. Часові залежності температури прогріву внутрішніх шарів стіни 100 мм з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г).

На рис. 2.3. наведені температурні розподіли для стіни з керамічної та силікатної цегли товщиною 200 мм для різного часу експонування за стандартним температурним режимом пожежі. Такі ж самі температурні розподіли були отримані для інших стінових елементів, параметри яких подані у табл. 2.1. Ці розподілення показують нерівномірність прогрівання. Для силікатної цегли різниця температур по товщині може складати 400 °С, що може призводити до передчасного її руйнування. Також такі картини розподілень отримані для інших випадків.

30 хв                      60 хв                      90 хв                      120 хв                      150 хв



*a.*

*б.*

Рис. 2.3. Температурні розподілення у стінах товщиною 200 мм з керамічної цегли (а) та силікатної цегли (б).

Для аналізу температурного розподілу по перерізу стінового елементу з метою розробки його способу апроксимації були побудовані графіки зміни температури у залежності від координати точки у перерізі, що вимірюється у поперечному напрямку. На рис. 2.4. наведені графіки зміни температури для стін товщиною 100 мм із різними матеріалами. Аналізуючи подані графіки, можна помітити, що вони можуть бути описані поліноміальними, експоненціальними, або сплайнними залежностями.

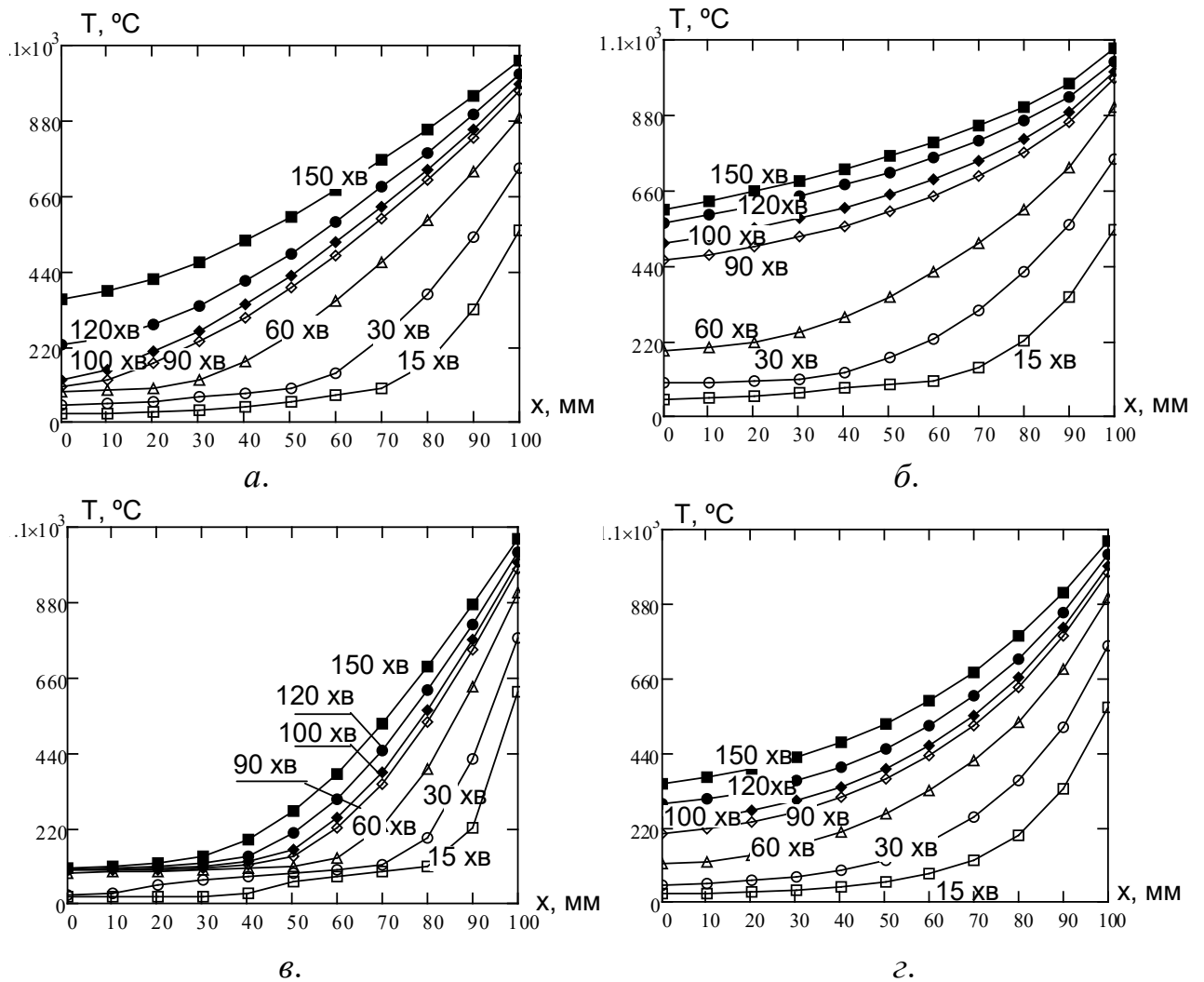


Рис. 2.4. Графіки температури прогріву внутрішніх шарів стіни 100 мм з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) для різних моментів часу.

Для вивчення розподілу температур у стінах різної товщини з одного матеріалу були побудовані відповідні графіки у цих елементах. Побудовані графіки подані на рис. 2.5. Дані графіки показують, що їх можна умовно розділити на дві ділянки із різними сталими значеннями першої похідної температури у залежності від просторової координати. Ділянка з більшим значенням похідної виділена сірим кольором. При інтерполяції даних залежностей необхідно встановити кількість та розташування точок, яких повинна контролюватися температур а під час випробувань

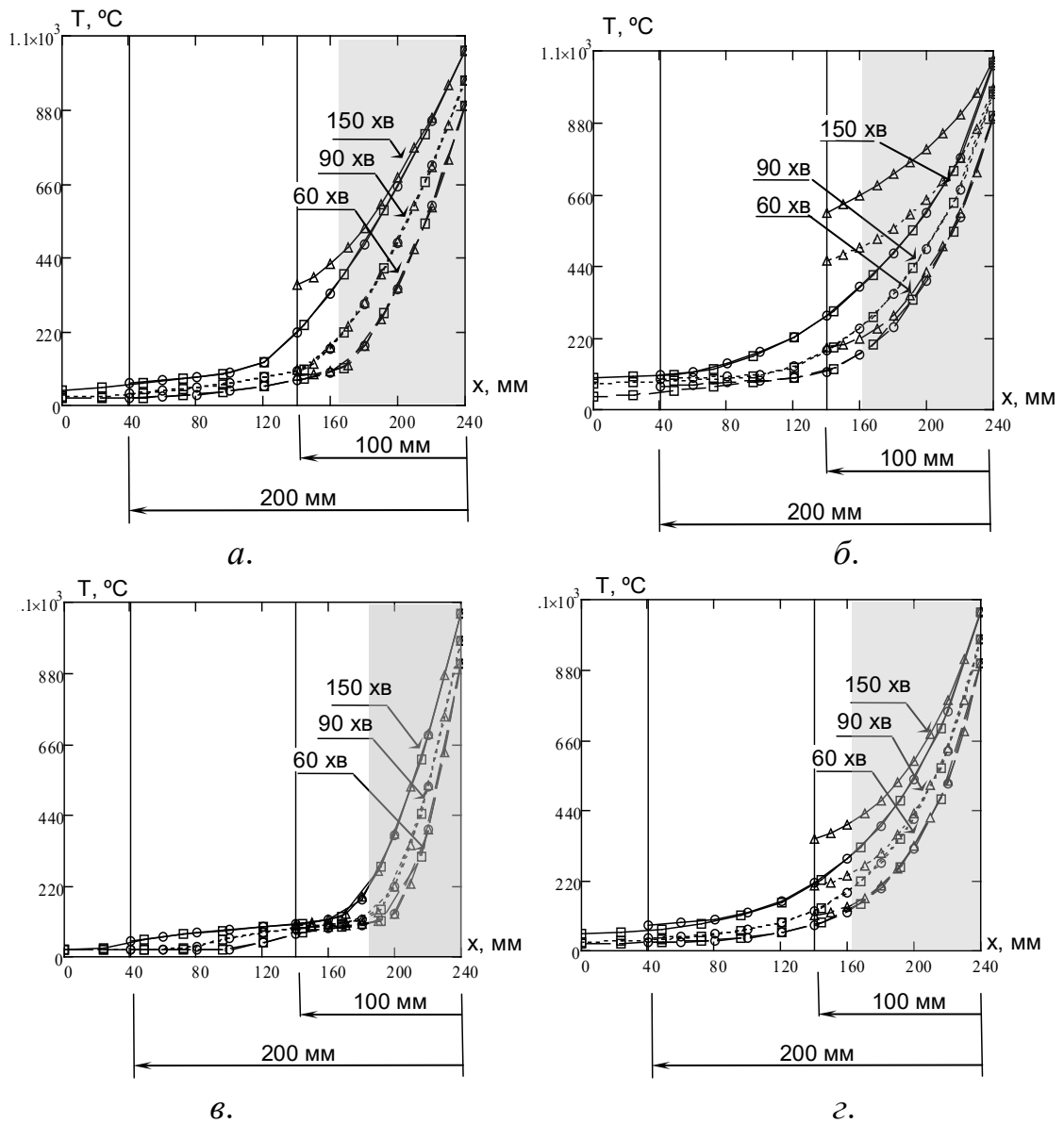


Рис. 2.5. Графіки температури прогріву внутрішніх шарів стін з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) для різних моментів часу:  $\square\square\square$  – стіна товщиною 240 мм;  $\cdots$  – стіна товщиною 200 мм;  $\triangle\triangle\triangle$  – стіна товщиною 100 мм.

Аналіз графіків на рис. 2.4 та рис. 2.5 дозволяє припустити, що можливо провести апроксимацію температурного розподілу за трьома контрольними точками в яких розташовані термопари. Для знаходження положень контрольних точок були побудовані графіки середніх значень перших похідних температурних розподілень у залежності від просторової координати. На рис. 2.6 наведені такі графіки.

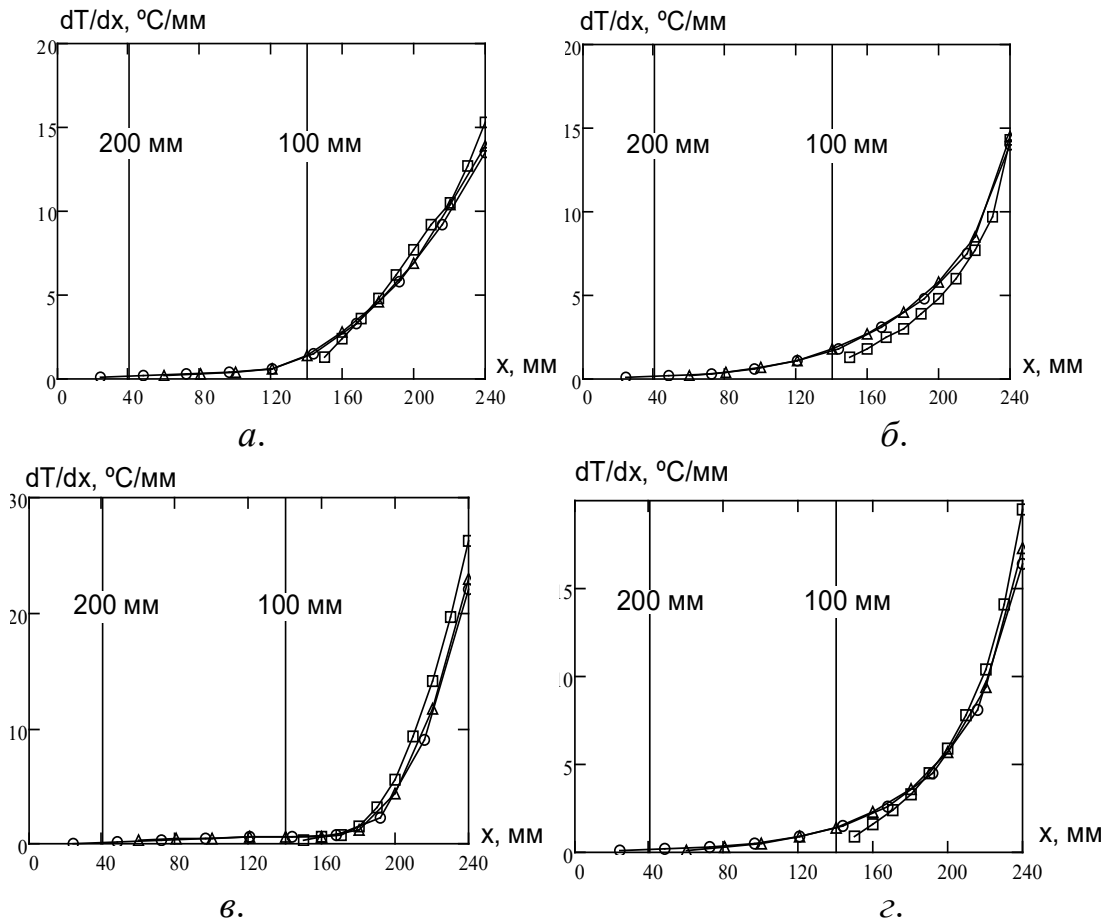


Рис. 2.6. Розподілення середніх значень похідних температури по поперечній координаті для стін з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г):  $\square\square\square$  – стіна товщиною 100 мм;  $\triangle\triangle\triangle$  – стіна товщиною 200 мм;  $-----$  – стіна товщиною 240 мм.

Залежності, які наведені на рис. 2.6 дозволяють визначити положення контрольних точок, де необхідно встановити температурні датчики для проведення адекватної інтерполяції температурних полів у перерізі стінових елементів, які піддаються вогневим випробуванням. Слід звернути увагу, що залежності перших похідних для стінових елементів із різною товщиною є подібними і контрольна точка може мати одне й те саме положення для стінового елемента з однакового матеріалу і різної товщини.

## 2.2. Обґрунтування методу інтерполяції температурних полів у перерізі стін за результатами вогневих випробувань

**2.2.1. Метод інтерполяції температурних полів шляхом розв’язку задачі теплопровідності у стінових елементах під час їх випробувань на вогнестійкість.** Аналізуючи роботи [62, 65 – 79], можна визначити два шляхи для проведення інтерполяції температурних полів у перерізі несучих стін за результатами їх випробувань. Перший шлях заснований на апроксимації температур, що вимірюються у контрольних точках внутрішніх шарів перерізу під



час випробувань, в яких встановлені датчики (термопари). Цей шлях добре вивчений у роботах [72 – 76]. При застосуванні даного підходу треба врахувати можливість випробування під навантаженням. Зважаючи на те, що отвори у стінових елементах сильно послаблюють їх переріз, можна припустити, що результати вимірювань деформацій та переміщень елементів під час випробувань можуть бути спотворені.

Інший шлях заснований на інтерполяції температурних полів у перерізі без проміжкових вимірювань за результатами вимірювання температури тільки на поверхнях елемента – обігрівній та необігрівній. Такий результат досягається шляхом заміни у моделі теплопередачі (2.1) – (2.4) ГУ III роду на ГУ I роду. Тобто результати вимірювання температури можуть бути використані як граничні умови для задачі, розрахункова схема до якої представлена на рис. 2.1.

Для поставленої задачі граничні умови на обігрівній поверхні стінового елемента записуються у вигляді:

$$T|_{x=b} = T_w. \quad (2.9)$$

На не обігрівній поверхні стіни вираз (1.6) ГУ III роду записується у вигляді:

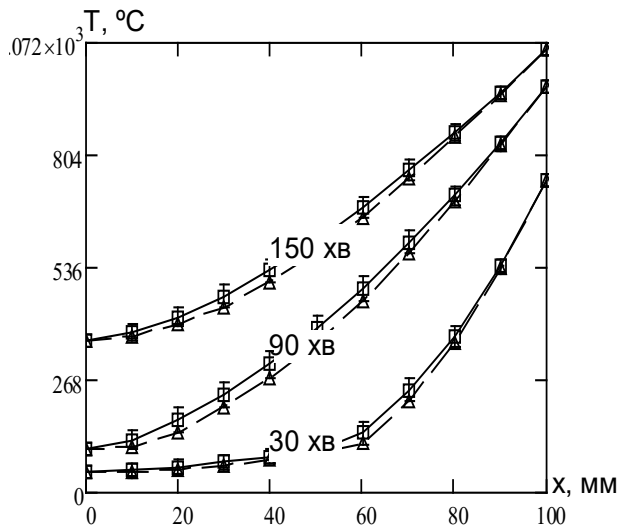
$$T|_{x=0} = T_n, \quad (2.10)$$

де  $T_w$ ,  $T_n$  – середні значення температур відповідно на обігрівній та необігрівній поверхнях у контрольні моменти часу, що отримуються протягом випробувань за показниками відповідних термопар згідно з методикою проведення випробувань, описаній у відповідних нормативних документах [22, 23]. Для розв'язку теплотехнічної задачі у даній постановці пропонується застосувати теплофізичні характеристики, рекомендовані у нормах [60]. ТФХ, що застосовані для розв'язку даної задачі наведені у табл. 2.2.

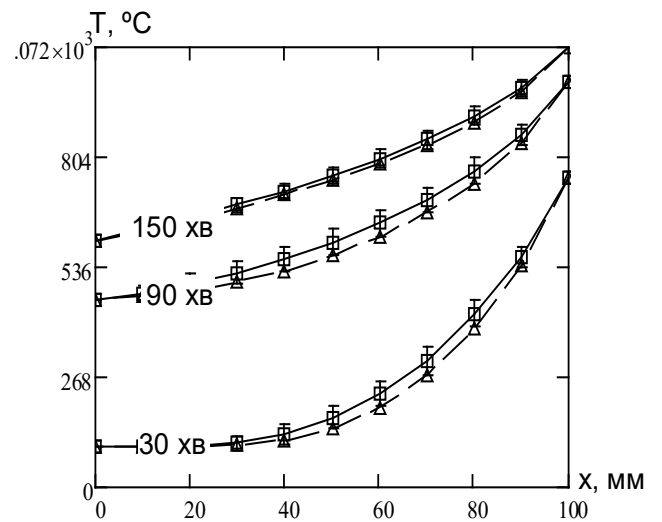
### Теплофізичні характеристики матеріалів несучих стін

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(T)$ , Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(T) \cdot \rho$ , Дж/(м <sup>3</sup> ·°С)	Джерело
<b>Кладка з керамічної цегли</b>		
0,42· при 0 °С ≤ $\theta$ ≤ 20 °С, 0,42+4,7·10 <sup>-3</sup> (T - 50) при 20°С < T ≤ 200°С, 1,26 при 200°С < T ≤ 1200°С	564ρ при 20 °С ≤ $\theta$ ≤ 100 °С, (1,1·10 <sup>4</sup> +13,5(T - 100))ρ при 100 °С ≤ $\theta$ ≤ 200 °С, (2,8·10 <sup>3</sup> +3,9(T - 100))ρ при 200 °С ≤ $\theta$ ≤ 1200 °С.	60]
<b>Кладка з силікатної цегли</b>		
1· при 0 °С ≤ $\theta$ ≤ 20 °С, 1+3,8·10 <sup>-2</sup> (T - 20) при 20°С < T ≤ 100°С, 4 - 1·10 <sup>-2</sup> (T - 100) при 100°С < T ≤ 300°С, 2 - 2,2·10 <sup>-3</sup> (T - 100) при 300°С < T ≤ 1200°С	1020ρ при 20 °С ≤ $\theta$ ≤ 100 °С, 2040ρ при 100 °С ≤ $\theta$ ≤ 125 °С, (10 <sup>4</sup> +204(T - 125))ρ при 125 °С ≤ $\theta$ ≤ 150 °С, (5,1·10 <sup>3</sup> +40,8(T - 150))ρ при 150 °С ≤ $\theta$ ≤ 200 °С (3,1·10 <sup>3</sup> +10,2(T - 200))ρ при 200 °С ≤ $\theta$ ≤ 400 °С 1020ρ при 400 °С ≤ $\theta$ ≤ 1200 °С	60]
<b>Кладка з блоків з легкого бетону</b>		
0,21· при 20 °С ≤ $\theta$ ≤ 50 °С, 0,21+0,034(T - 50) при 50°С < T ≤ 100°С, 1,89+0,025(T - 100) при 100°С < T ≤ 150°С, 0,63+4,2·10 <sup>-4</sup> (T - 150) при 150°С < T ≤ 400°С, 0,525 при 400°С < T ≤ 1200°С	1170ρ при 20 °С ≤ $\theta$ ≤ 100 °С, 2,106·10 <sup>4</sup> ρ при 100 °С ≤ $\theta$ ≤ 150 °С, (7·10 <sup>3</sup> +46,8(T - 150))ρ при 150 °С ≤ $\theta$ ≤ 200 °С, (4,7·10 <sup>3</sup> +5,85(T - 200))ρ при 200 °С ≤ $\theta$ ≤ 500 °С 2,925·10 <sup>3</sup> ρ при 500 °С ≤ $\theta$ ≤ 1200 °С	60]
<b>Важкий бетон на гранітному заповнювачі</b>		
$2 - 0,2451 \frac{T}{100} + 0,0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2$	900ρ при 20 °С ≤ $\theta$ ≤ 100 °С, (900+(T - 100))ρ при 100°С < T ≤ 200°С, (1000+0,5(T-100))ρ при 200°С < T ≤ 400°С, 1100ρ при 400°С < T ≤ 1200°С	40]

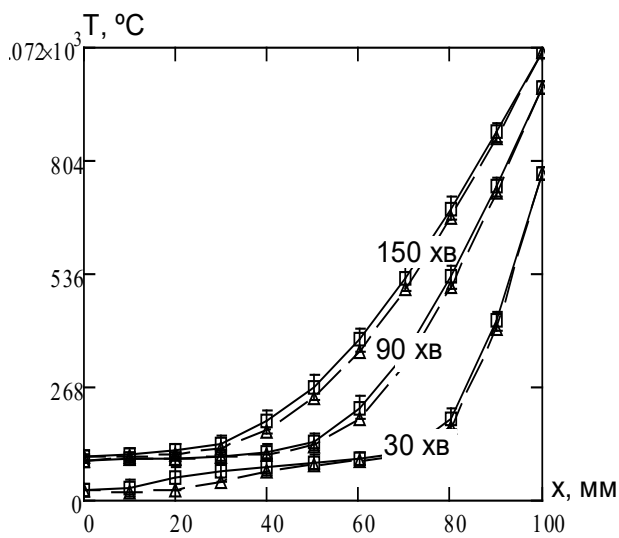
Розв'язок задачі проводився відповідно до алгоритму, описаному у п. 2.1.1 із застосуванням формул (2.4) – (2.8). При цьому результати порівнювалися з даними, що отримані у результаті розрахунку для ГУ III роду. На рис. 2.7 подані результати розрахунку.



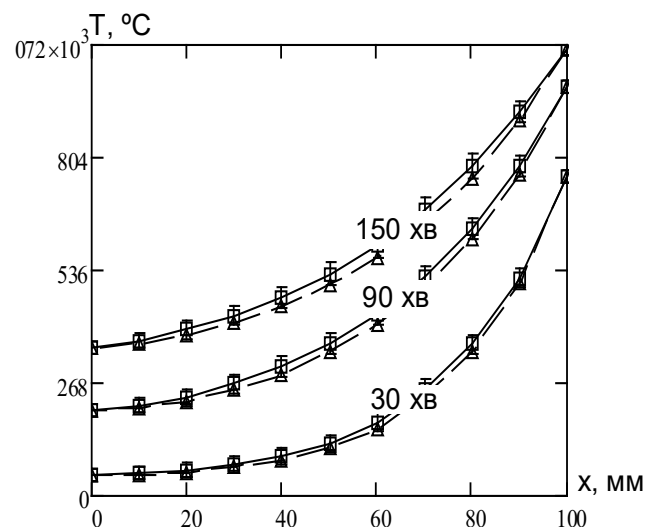
*a.*



*б.*



*в.*



*г.*

Рис. 2.7. Графіки температури прогріву внутрішніх шарів стіни 100 мм з керамічної цегли (*a*), силікатної цегли (*б*), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (*в*), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (*г*) для різних моментів часу:  $\square\square\square$  – вихідні дані;  $\triangle\triangle\triangle$  – дані, отримані у результаті інтерполяції.

Аналіз графіків на рис 2.7 показав, що дані, отримані у результаті застосування запропонованого методу інтерполяції є достатньо точним, оскільки входять у межі експериментальної похибки. На рис. 2.8 подані діаграми відносного та середньоквадратичного відхилення у залежності від матеріалу стінового елементу.

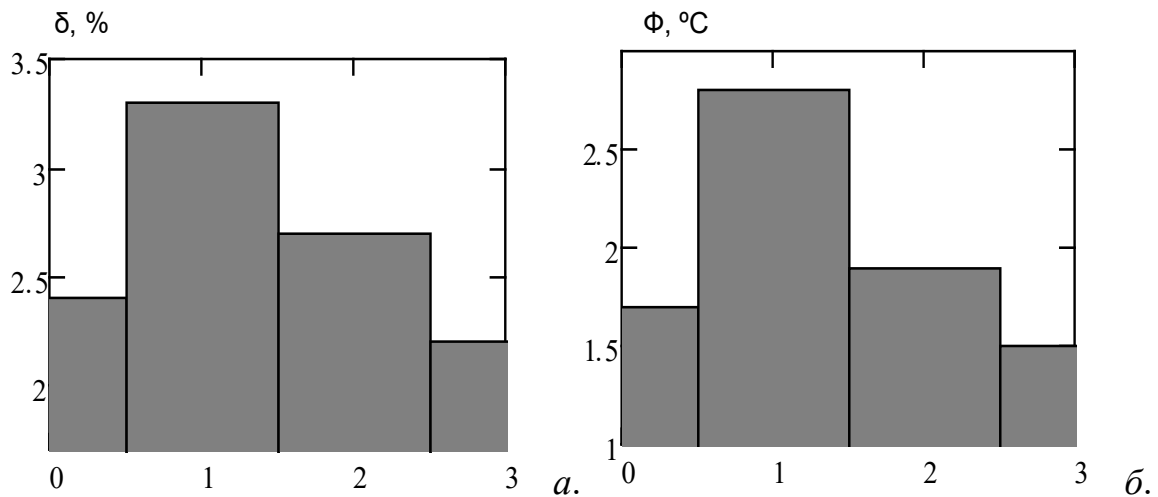


Рис. 2.8. Діаграми середнього значення відносного відхилення (а) та середнього значення середньоквадратичного відхилення (б): 0 – стіна з керамічної цегли; 1 – стіна із силікатної цегли; 2 – стіна із блоків з легкого бетону; 3 – стіна з важкого бетону на гранітному заповнювачі.

Даний підхід має недолік, який полягає в тому, що для розв'язку задачі теплопровідності потрібно окремо підбирати просторовий та часовий кроки. Автоматичне підбирання кроків ускладнюється великими стрибкоподібно змінними значеннями теплоємності і теплопровідності матеріалів стінових елементів. Тому для практичної реалізації розрахунку можна застосувати номограмний метод.

**2.2.2. Номограмний метод інтерполяції температурних полів у стінових елементах під час їх випробувань на вогнестійкість.** При використанні номограмного методу для визначення температурних розподілень температурні розподілення представляються афінним кривими, що описуються подібними функціоналами, де відрізняються тільки значення їх параметрів. Аналізуючи криві, подані на рис. 2.4 можна припустити, що вони можуть бути афінними.

Для їх апроксимації застосуємо алгоритм, заснований на представленні температурних кривих узагальненим виразом:

$$T_{k,i} = T_{0k} + (T_{\max k} - T_{0k}) \left[ \frac{i}{n} \right]^{Q_k}, \quad (2.11)$$

де  $T_{k,i}$  – температура  $i$ -тої точки перерізу стіни (див рис. 2.9) у  $k$ -тий момент часу;  
 $T_{0k}$ ,  $T_{\max k}$  – температура першої та останньої точок у  $k$ -тий момент часу;  
 $n$  – кількість інтервалів між контрольними точками;  
 $Q_k$  – показник ступеня параболи у  $k$ -тий момент часу, що визначається за алгоритмом, поданим на рис. 2.10.

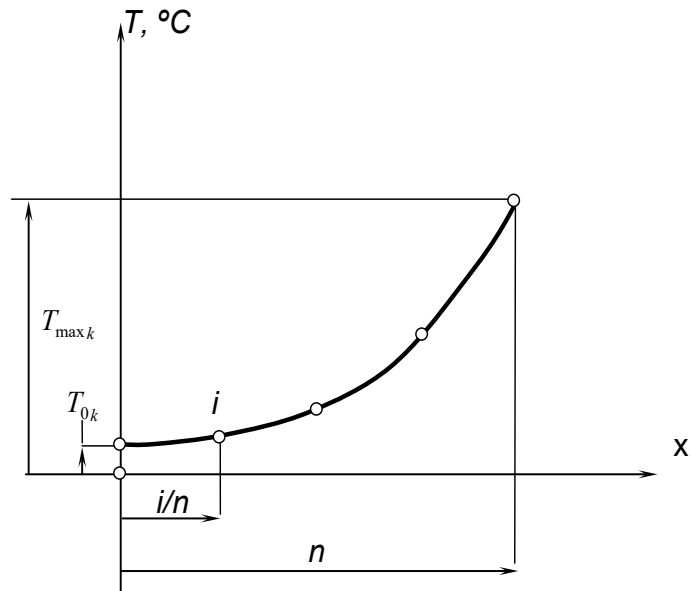


Рис. 2.9. Схема апроксимації температурних розподілів стін під час випробувань на вогнестійкість

Для оцінки адекватності застосованого методу апроксимації були побудовані графіки залежностей середньоквадратичного відхилення. Побудовані графіки подані на рис. 2.11. Аналіз даних графіків показує, що вибраний метод апроксимації дає адекватні результати, оскільки максимальні значення середньоквадратичного відхилення складають не більше 13 °С для кожного для досліджуваних матеріалів.

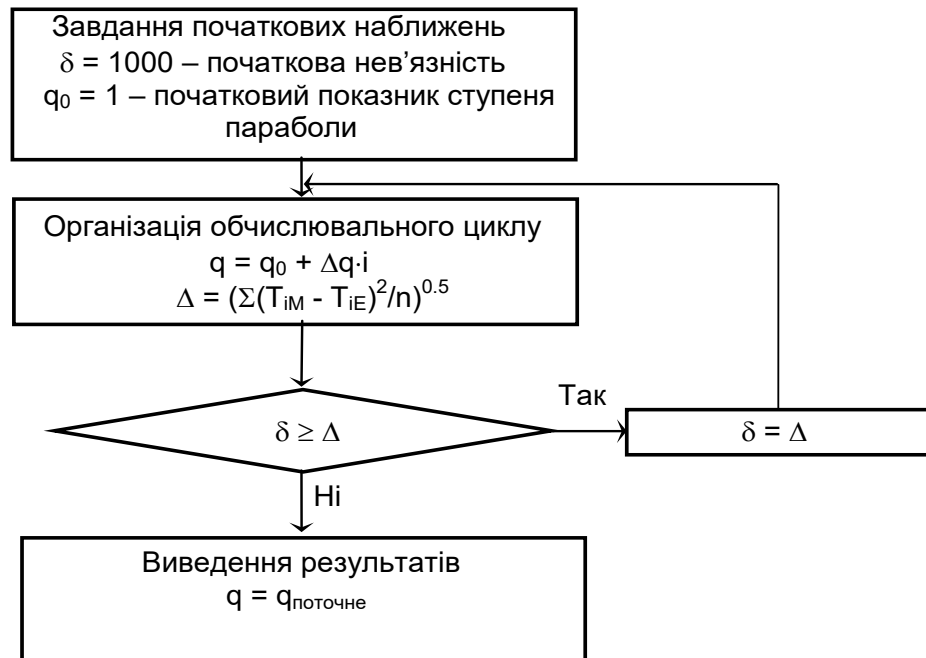


Рис. 2.10. Блок-схема алгоритму визначення показника ступеня апроксимуючого поліному.

Для апроксимації температурного розподілу був застосований однопараметричний функціонал. Змінним параметром у даному випадку є ступеневий показник  $Q_k$ . Це дає змогу побудувати залежності цього показника від часу і товщини стіни. Дані графіки побудовані для стін товщиною, що відповідає ряду стандартних значень 70, 90, 100, 140, 170, 190, 200, 240, 300, 360 мм. Даний ряд значень вибраний згідно з європейським стандартом для розрахунку кам'яних конструкцій на вогнестійкість [60]. На рис. 2.12 подані такі графіки. Для побудованих графіків характерна особливість, яка полягає у наявності локальних максимуму та мінімуму на ділянці між 15 та 30 хвилинам. Дана особливість найбільш яскраво виражається для стін з легкого бетону. Це явище пояснюється наявністю інтенсивного випаровування та фільтрації вільної вологи крізь пори матеріалу каменів та розчину. Аналіз поданих графіків показує, що їх можна апроксимувати і описати функціоналом з трьома змінними параметрами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  типу:

$$Q_k = a \exp(b \cdot (k_{\max} - k)) + c. \quad (2.12)$$

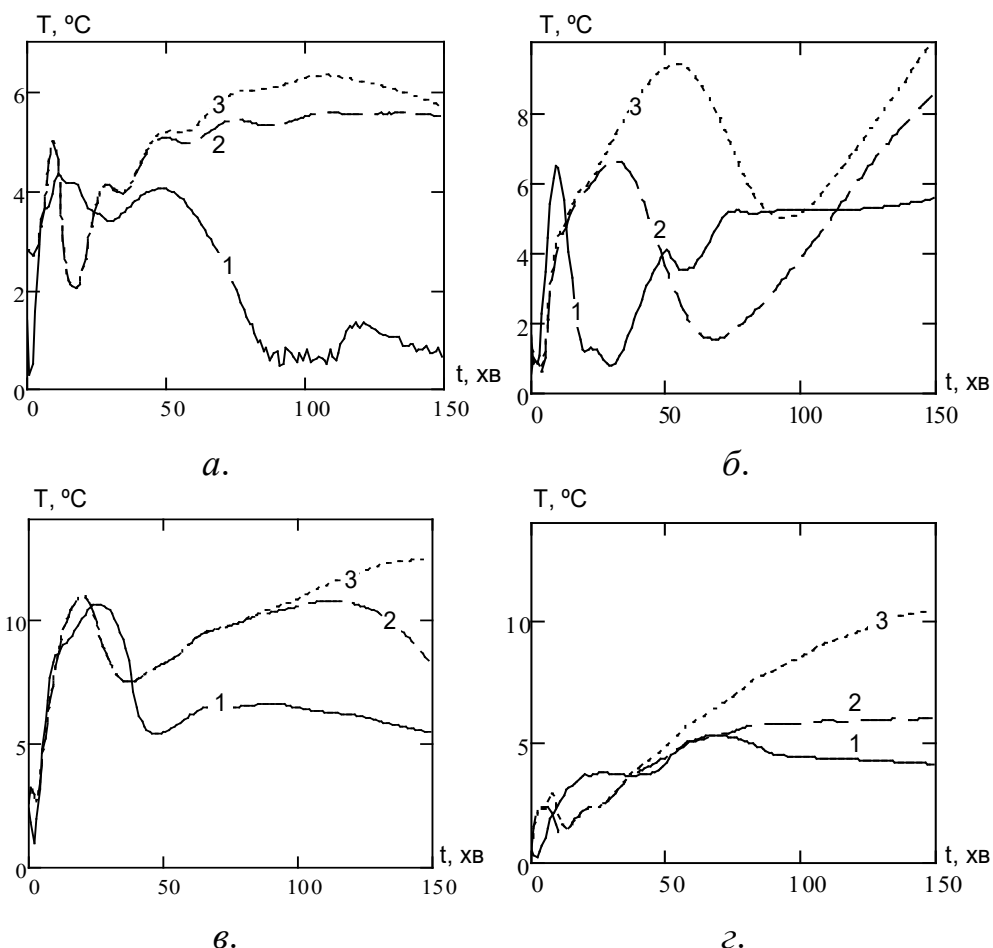


Рис. 2.11. Графіки залежностей від часу середньоквадратичного відхилення для стін з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) із різною товщиною: 1 – стіна товщиною 100 мм; 2 – стіна товщиною 200 мм; 3 – стіна товщиною 240 мм.

Це у свою чергу дає змогу представити номограми, які подані на рис. 2.4 і які відповідають номограмам для побудування температурних розподілів у перерізі стін аналітичними залежностями, що є зручними для їх застосування при створенні відповідного програмного забезпечення.

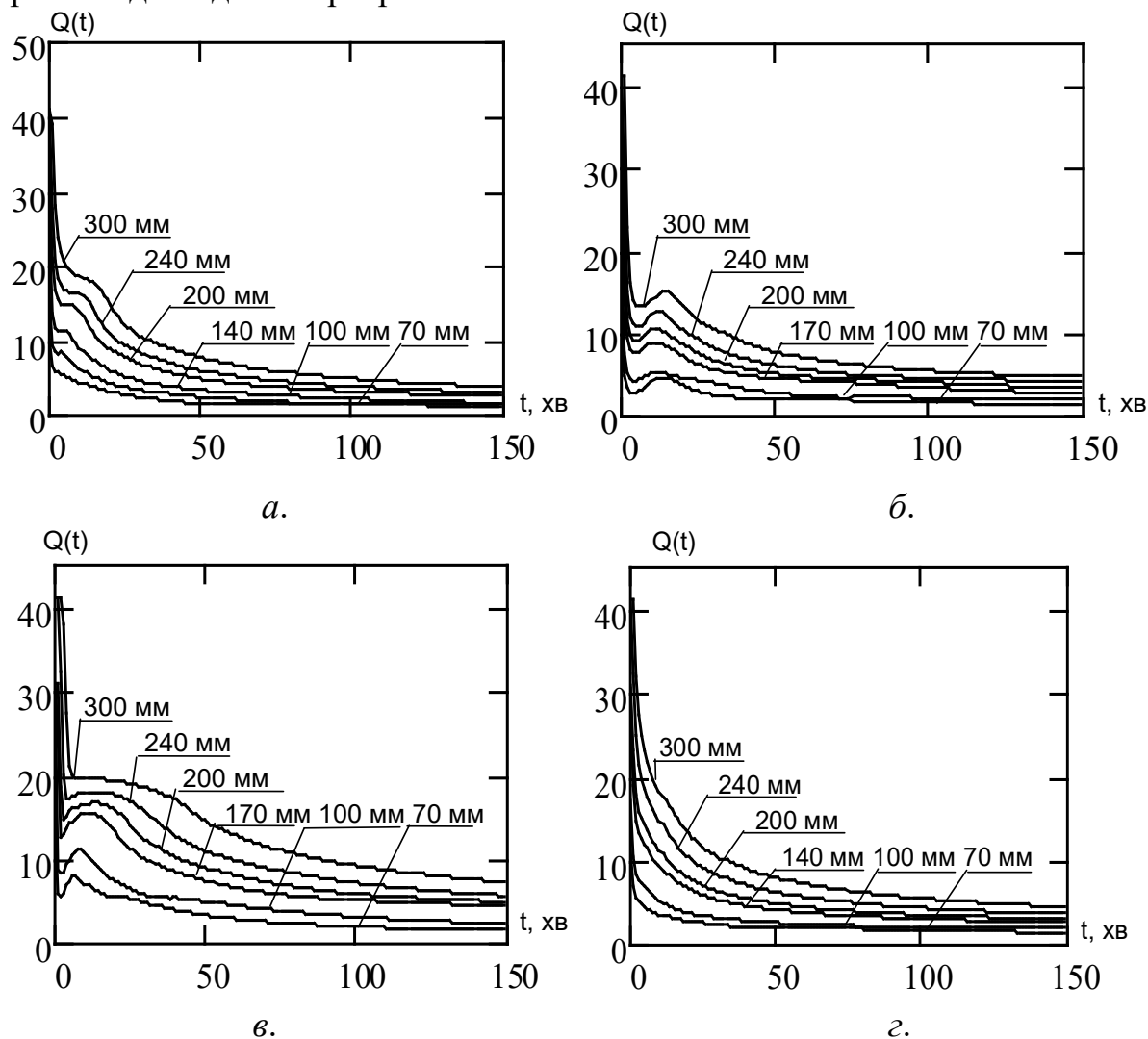


Рис. 2.12. Графіки залежностей від часу показника ступеня параболі від часу для стін з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) для різної товщини.

Для визначення коефіцієнтів виразу (2.12) був застосований алгоритм Левенберга-Марквардта [98 – 100], блок схема якого подана на рис. 2.13. У даному алгоритмі  $J$  – матриця Якобі:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(w_1, x_1)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w_R, x_1)}{\partial w_R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(w_1, x_N)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w_R, x_N)}{\partial w_R} \end{pmatrix}. \quad (2.13)$$



Рис. 2.13. Блок-схема алгоритму Левенберга – Марквардта визначення коефіцієнтів регресійної функції.

Результати розрахунку коефіцієнтів подані у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

**Значення параметрів регресійної функції для стін з керамічної цегли**

Товщина стіни, мм	Параметр $a$ , $\times 10^{-3}$	Параметр $b$	Параметр $c$
70	0,44	0,064	1,432
90	1,012	0,06	1,583
100	1,306	0,059	1,669
140	1,324	0,062	2,274
170	1,612	0,056	2,791
190	3,86	0,056	3,045
200	5,669	0,054	3,175
240	5,507	0,043	3,888
300	17	0,049	4,781
365	50	0,056	5,671

Таким же самим чином були розраховані коефіцієнти апроксимуючого функціонала (2.12) для стін із інших матеріалів. Результати цього розрахунку наведені на рис. 2.14.



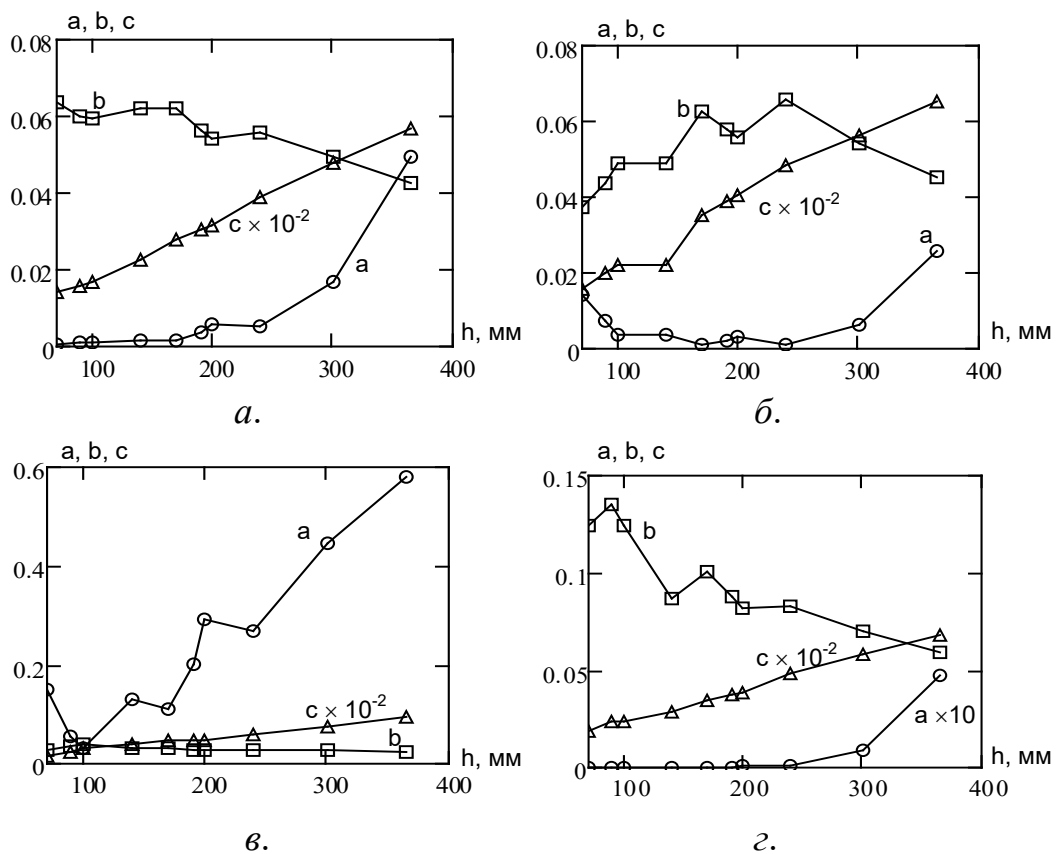


Рис. 2.14. Графіки залежностей від часу коефіцієнтів апроксимуючого функціоналу (2.12) від товщини стіни: з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) із різною товщиною.

На рис. 2.15 подані результати розрахунку при використанні виразу та (2.12). Розглядаючи отримані результати можна побачити, що даний функціонал не в повній мірі може відбити наявність локальних максимуму та мінімуму, але якщо зважити на те, що інтервал від 15 до 30 хв не впливає на настання граничного стану (в цьому інтервалі він ніколи не настає), можна попередньо відзначити ефективність запропонованого метода апроксимації. Це дозволяє використати отримані результати для визначення температурних розподілів при використанні виразу (2.11).

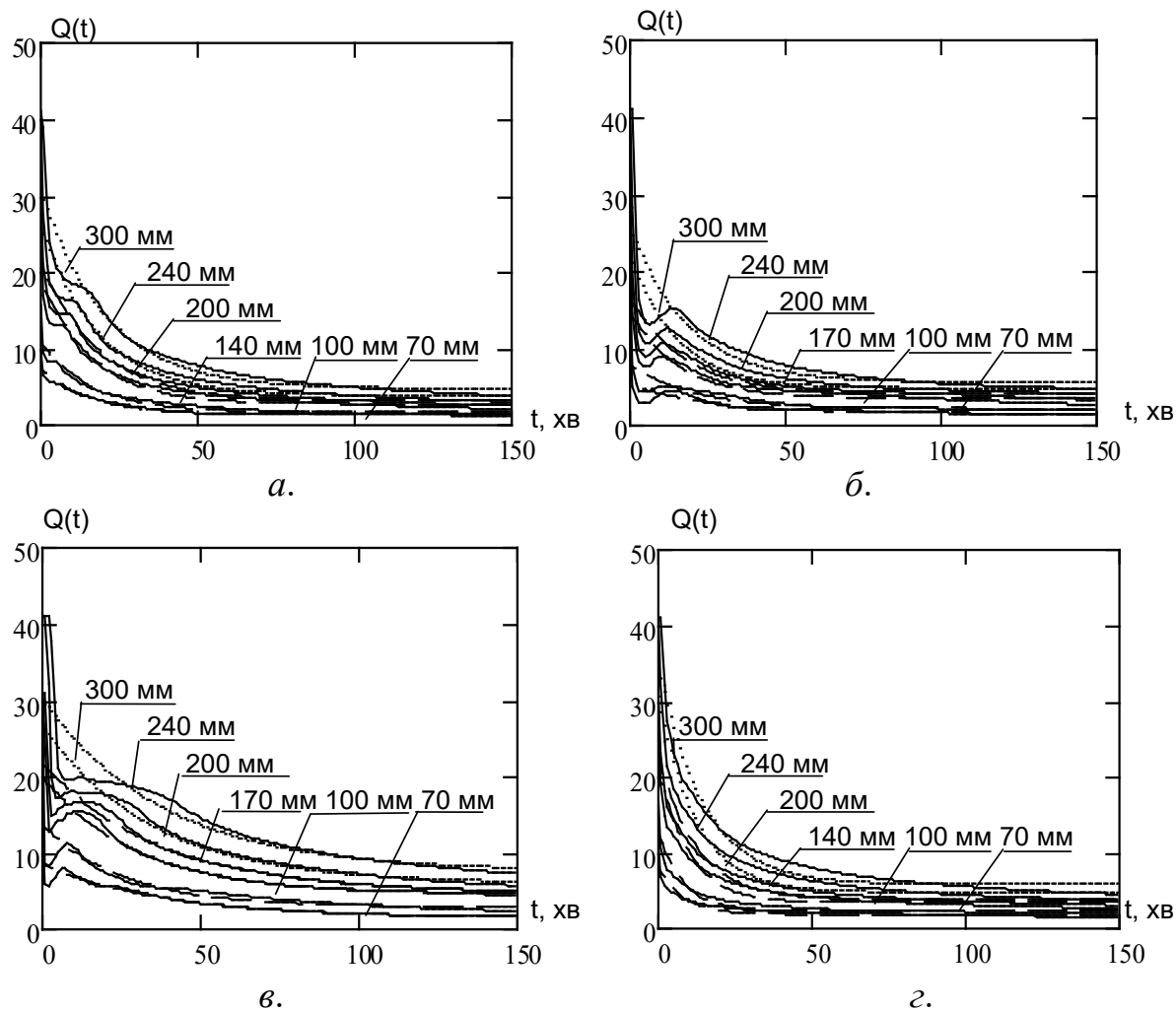


Рис. 2.15. Графіки залежностей від часу показника ступеня параболи від часу для стін з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) для різної товщини: сполосна лінія – вихідні дані, пунктирна – результат апроксимації.

На рис. 2.16 подані результати розрахунку розподілу температурних полів з використанням виразів (2.11) та (2.12). Отримані результати засвідчують високу точність отриманих даних, оскільки відхилення вкладаються у межі допустимої експериментальної похибки.

Отримані результати дозволяють їх застосування для розрахунку температурних розподілів у стінових елементах за виміряним температурними показниками на їх поверхнях під час проведення випробувань на вогнестійкість цих елементів.

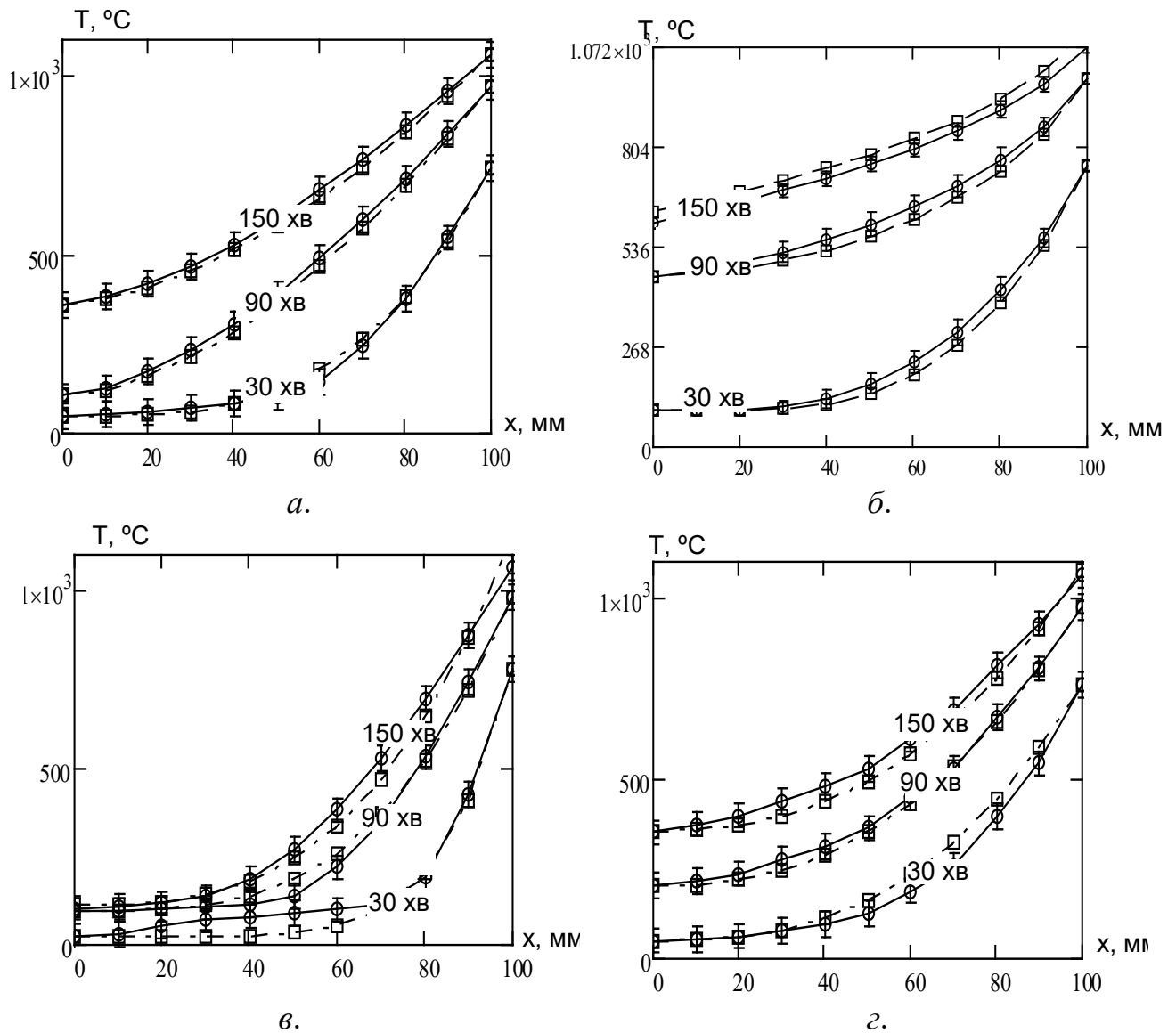


Рис. 2.16. Графіки температури прогріву внутрішніх шарів стіни 100 мм з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) для різних моментів часу: - - - - - вихідні дані;  $\square$   $\circ$   $\triangle$  – дані, отримані у результаті інтерполяції.

Розподілення температур у стіновому елементі, підданому стандартним вогневим випробуванням визначається за значеннями температури, які отримані шляхом прямих вимірювань протягом часу випробувань, при використанні такої формули:

$$T_{k,i} = T_{w2k} + (T_{w1k} - T_{w2k}) \chi^{a_h \exp(b_h \cdot (k_{max} - k) + c_h)}, \quad (2.14)$$

де  $T_{w1k}$ ,  $T_{w2k}$  – відповідно температури обігрівної та необігрівної поверхонь стіни, підданій випробуванням, у  $k$ -тий момент часу;

$a_h$ ,  $b_h$ ,  $c_h$  – коефіцієнти регресії, відповідні певній товщині для стіни із даного матеріалу;

$k$ ,  $k_{max}$  – поточний та максимальний дискретний час випробування, що визначаються через інтервал 1 хв.

Коефіцієнти регресії визначаються за таблицями типу табл. 2.3, що відповідають графікам на рис. 2.14. При невідповідності товщини стіни табличним значенням коефіцієнти регресії можна визначити шляхом лінійної інтерполяції.

**2.2.3. Адекватність температурних розподілень, отриманих за допомогою апроксимації номограм.** Адекватність отриманих результатів можна оцінити при порівнянні вихідних даних із даними, що отримані за розробленим методом апроксимації номограм. В якості критеріїв можна використати значення середньоквадратичного відхилення, середнього відносного відхилення та критерію Фішера (F-критерію). На рис. 2.17 представлені результати розрахунку середньоквадратичного відхилення у залежності від часу для стін із різною товщиною. Залежності середньоквадратичного відхилення, розраховані для стін з іншими значеннями товщини, мають подібний вигляд.

Аналіз графіків, поданих на рис. 2.17 показує, що максимум середньоквадратичного відхилення знаходиться в інтервалі від 20 до 50 хв, що пояснюється помітною похибкою значень показника ступеня, отриманими шляхом регресійного аналізу саме на цій ділянці. Інша ділянка де середньоквадратичне відхилення досягає високих значень знаходиться в інтервалі від 130 до 150 хв. Найбільше значення середньоквадратичного відхилення складає 18 °С, що дещо перевищує значення отримані за апроксимацією шляхом вирішення прямої задачі теплопровідності. Тим не менше, отримане значення не є великим, і тому дозволяє стверджувати, що номограмний метод у представленні номограм регресійними залежностями є достатньо ефективним.

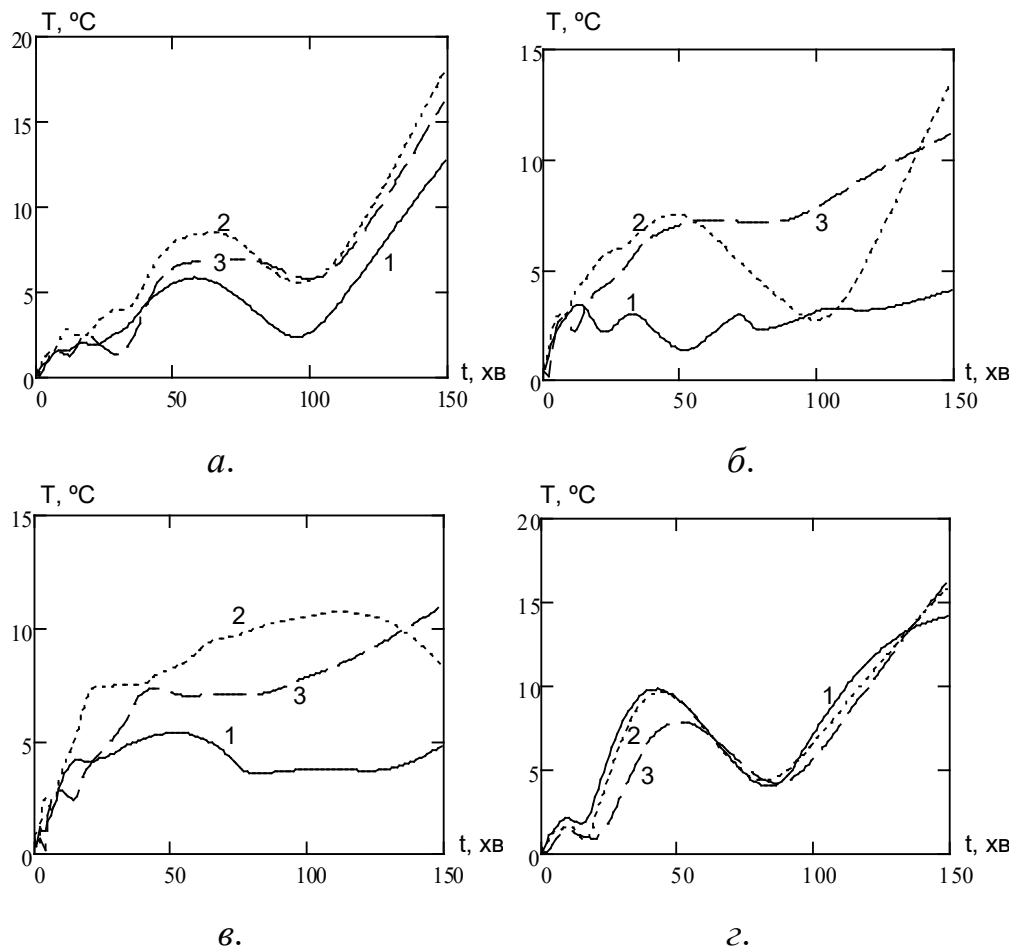


Рис. 2.17. Графіки залежностей від часу середньоквадратичного відхилення для стін з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) із різною товщиною: 1 – стіна товщиною 100 мм; 2 – стіна товщиною 200 мм; 3– стіна товщиною 300 мм.

На рис. 2.18 представлені результати розрахунку середнього відносного відхилення у залежності від часу для стін із різною товщиною. Залежності середнього відносного відхилення, розраховані для стін з іншими значеннями товщини, мають подібний вигляд. Так само як і для середньоквадратичного відхилення максимум в інтервалі від 20 до 50 хв, що пояснюється підвищеною похибкою значень показника ступеня саме на цій ділянці. Найбільше значення середнього відносного відхилення складає 14 %, що також дещо перевищує значення отримані за апроксимацією шляхом вирішення прямої задачі теплопровідності.

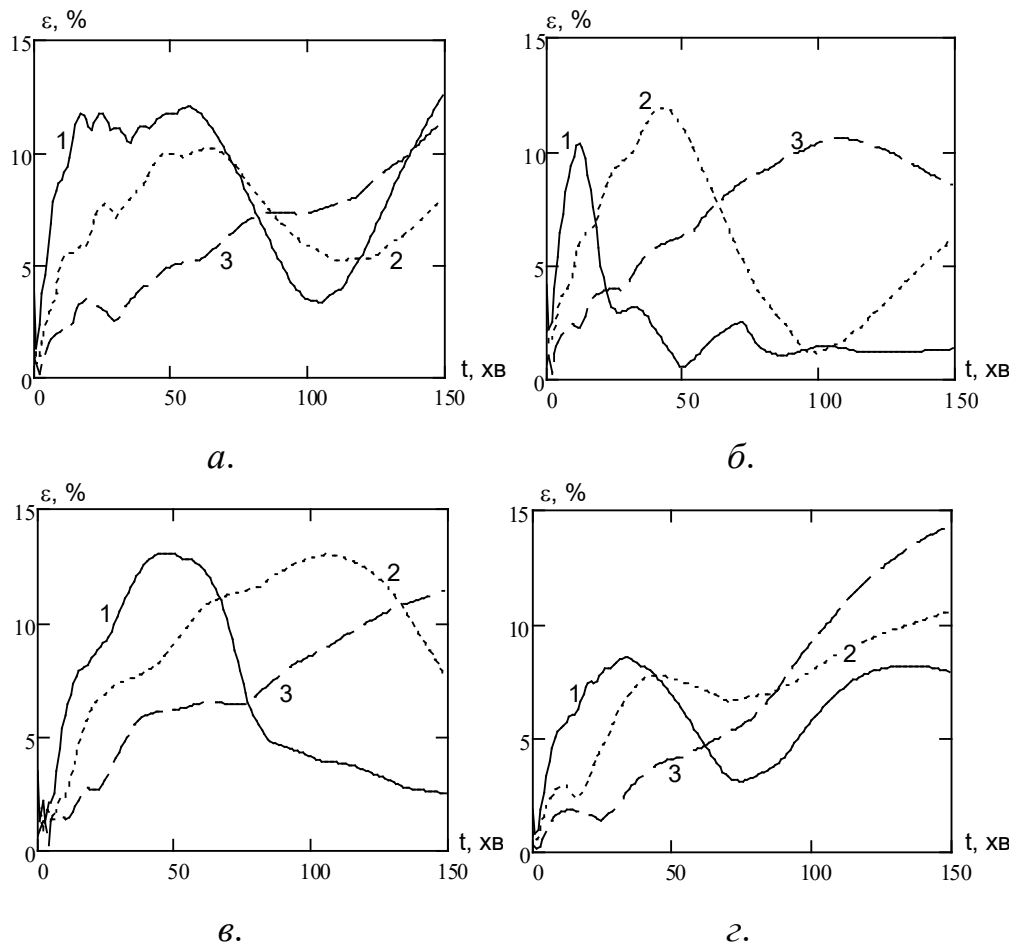


Рис. 2.18. Графіки залежностей від часу середнього відносного відхилення для стін з керамічної цегли (а), силікатної цегли (б), із блоків з бетону на легкому заповнювачі (в), із панелей з бетону на гранітному заповнювачі (г) із різною товщиною: 1 – стіна товщиною 100 мм; 2 – стіна товщиною 200 мм; 3 – стіна товщиною 300 мм.

Для більш точного аналізу дані, що отримані при теоретичному підході і відповідні результати інтерполяції, отримані різними методами за критерієм Фішера. Результати порівняльного аналізу подані у табл. 2.3. Дані табл. 2.4 показують, що обидва методи дають точні та адекватні результати, оскільки в жодному випадку критерій Фішера не перевищує табличного значення. У той же час перший, метод, заснований на розв'язку прямої задачі теплопровідності у даному випадку є більш точним. Разом із тим, застосування першого методу не завжди є прийнятним, оскільки має більш складну реалізацію, прив'язаний до завдання ТФХ, що може привести до наявності мінімуму в розподілі температури.

Таблиця 2.4

**Дані порівняльного аналізу результатів інтерполяції, отриманих за різними способами**

Метод апроксимації	Максимальне середнє відносне відхилення, %	Максимальне середньоквадратичне відхилення, °С	Максимальне значення F-критерію	
			обчислене	табличне
1 спосіб	4	13	0,64	1,01
2 спосіб	14	25	0,88	

Дані табл. 2.4 свідчать про високу точність методів інтерполяції, однак, найбільш точним є перший метод. Всі розроблені методи можна використовувати для проведення наближення температурних розподілів за дискретними вимірюваннями температур у контрольних точках де встановлюються термопари.

## РОЗДІЛ 3

### ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Експериментальне обладнання

Для випробувань використовувалась вогнева піч ВП-1 з навантажувальною рамою, інв.№20 (Атестат № 24-2/5983 чинний до жовтня 2013 року), приміщення для кондиціонування зразків ПКЗ-2, інв.№16 (Атестат № 24-2/0442 чинний до лютого 2014 року) і засоби вимірювальної техніки, які описані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

**Засоби вимірювальної техніки**

№ п/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1	Лінійка вимірювальна	-	від 0 до 1000 мм	± 1 мм
2	Секундомір СОСпр-2б-2-010	3187	від 0 до 60 хв,	Середній клас точності
3	Система контролю температури “СКОРАД” на основі блоків Вега-5	-	від -5 до 1300°С	Границі допустимої похибки вимірювання ± 1,5 °С
4	Термопары ТХА, 34 одиниць	-	від -50 до 1200 °С	Клас 2
5	Термопары N (1450 мм), 6 одиниць	-	від 0 до 1300 °С	Клас 2
6	Термогігрометр АРТ-06917	1045	від 25 до 90 % від 0 до 50 °С	± 5 % ± 1,0 °С
7	Штангенциркуль ШЦ-Іа	0711110	від 0 до 300 мм	± 0,05 мм
8	Мановакууметр цифровий ММЦ-200	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	021	Від 0 до 200 г	± 0,1 г
11	Щупи діаметром: 6мм 25мм	Б/н Б/н	6мм 25мм	± 0,1 мм ± 0,1 мм
12	Ваги кранові електронні OCS-M-lt	1504	Від 10 кг до 1000 кг	Клас точності - середній
13	Віддалемір лазерний ручний Disto D3a BT	902830600	Від 0,05 до 100 м.	± 1 мм
14	Прес гідравлічний ИП-500	846	Від 0 до 500000 Н	± 1%
15	Ваги механічні гравітаційні шкальногирьові ВСП - 200	1124	Від 0 до 200 кг	± 1 г



На рис. 3.1 подана схема випробувальної печі, а її загальний вигляд поданий на рис 3.2.

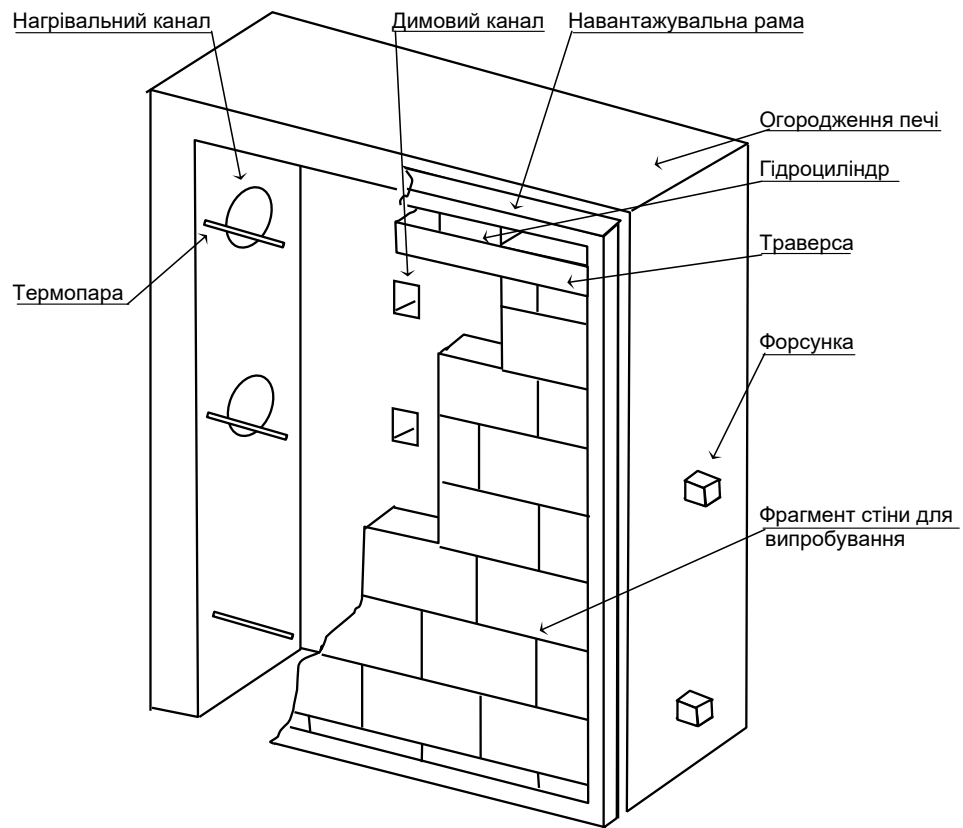


Рис. 3.1. Схема випробувальної установки.



*a.*



б.

Рис. 3.2. Загальний вигляд установки для випробувань:  
а – загальний вид; б – форсункова система.

На рис. 3.3 подана система контролю температур, а на рис 3.4 поданий вигляд інтерфейсу програмного забезпечення, що реалізує цифрову обробку даних та керування паливно-форсунковою системою

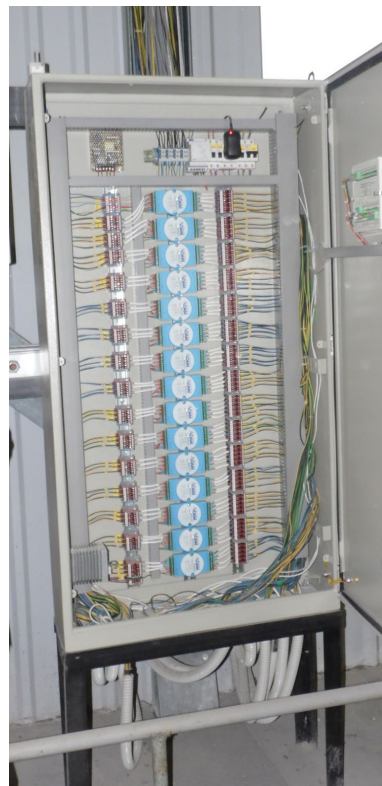


Рис. 3.3. Система контролю температур.

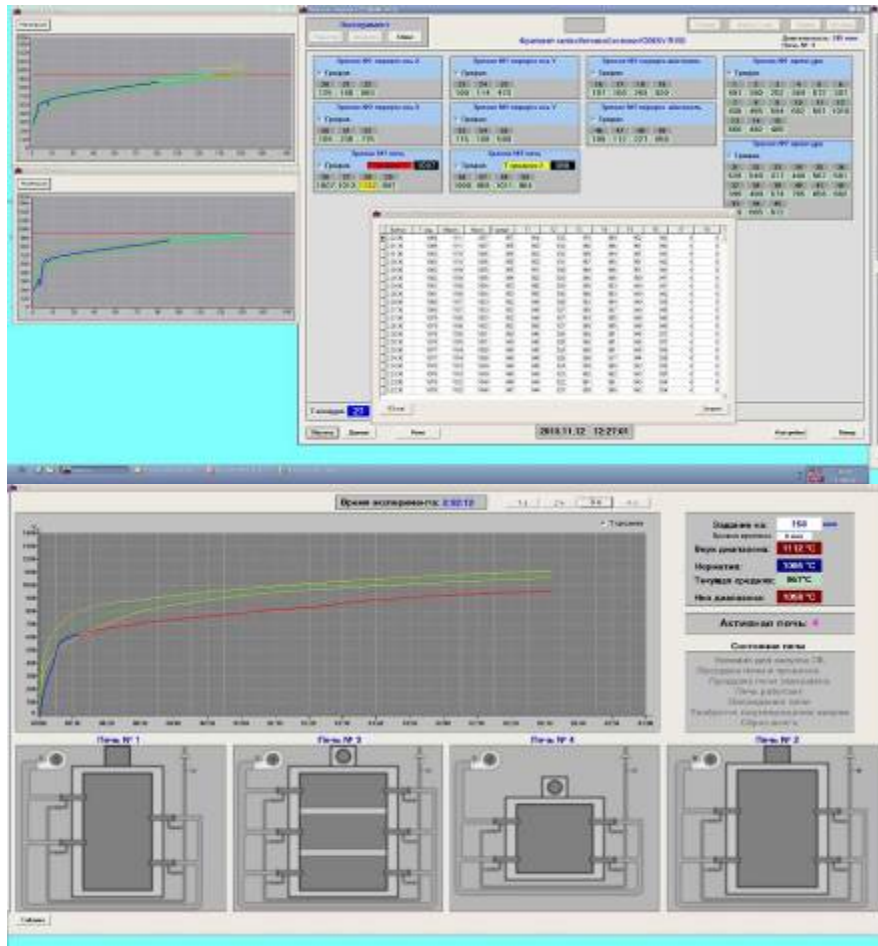


Рис. 3.4. Інтерфейс програмного забезпечення системи контролю температур.

На рис. 3.5 показані загальний вигляд та схема термопар для вимірювання температур у робочому просторі печі.

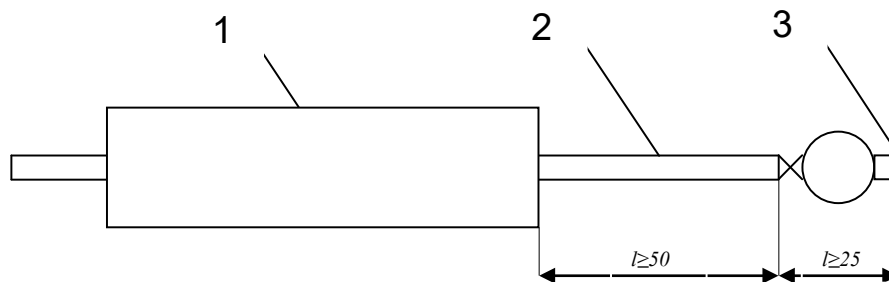


Рис. 3.5 Термопара для вимірювання температури в печі:

1 – теплозахисна оболонка; 2 – захисний кожух; 3 – вимірювальний спай.

### 3.2. Методика виготовлення та формування зразків залізобетонних стін для випробувань

**3.2.1. Виготовлення фрагменту залізобетонної стіни-зразку для вогневих випробувань.** Для вивчення ефективності розробленого методу інтерполяції температурних полів у перерізі фрагментів стін при їх випробуванні на вогнестійкість були розглянуті залізобетонна стіна та блочна стіна з легкого бетону. У табл. 3.2 подані основні характеристики та технічне описання вибраних стін для дослідження. Згідно з даними табл. 3.2 стіни, що вивчаються є поширеними для використання у будівництві, і це обумовлює їх використання в якості об'єктів дослідження.

Перший тип зразків для випробування являє собою фрагменти залізобетонної стіни квадратного, що має розміри 3200×3000×200 мм. На рис. 3.6 показана геометрія перерізу та схема розташування арматури.

Таблиця 3.2

**Технічні характеристик стін для дослідження**

Тип стіни	Матеріал стіни	Конструктивні характеристики
1-й тип	Залізобетон	Несучі стіни з високим рівнем механічного навантаження, що призначені для виконання несучих та огорожувальних функцій. Використовується для огороження приміщень, вентиляційних та ліфтових шахт у будівлях із залізобетону
2-й тип	Блоки із легкого бетону	Несучі та самонесучі стіни із низьким рівнем механічного навантаження, що призначені для виконання несучих та огорожувальних функцій у будівлях з несучим залізобетонним або металевим каркасом.

У табл. 3.3 зведені величини основних параметрів стінового фрагменту. Відповідно до вимог програми експерименту щодо даного фрагменту залізобетонної стіни він має бути виготовлений з бетону С 30/35 (В30). Для виготовлення фрагменту була застосована бетонна суміш, склад якої мав параметри, які наведені у табл. 3.4.

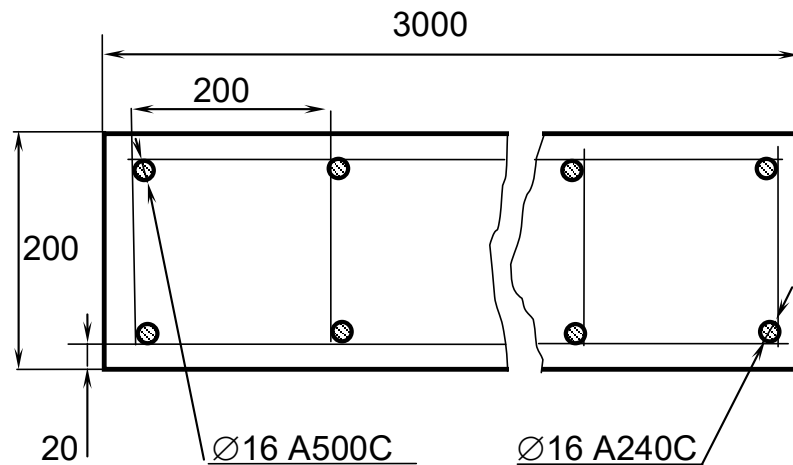


Рис. 3.6. Геометричні параметри та схема армування перерізу фрагменту залізобетонної стіни-зразку для випробувань

Таблиця 3.3

**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

**Склад бетонної суміші для виготовлення залізобетонних стін-зразків  
для випробувань**

Назва компоненту	Вміст у пропорціях на 1 м <sup>3</sup> , кг	Допустиме відхилення, кг
Портландцемент марки «400»	460	10
Пісок кварцовий річкової	660	
Щебінь гранітний	1150	
Вода водопровідна	165	

Склад виготовлених зразків відповідає важкому бетону на гранітному заповнювачі з якого зроблена залізобетонна стіна, що досліджується і є найпоширенішим при виготовлення залізобетонних стін, будівель [47], а також досліджуваних зразків елементів конструкцій і моделей елементів конструкцій для вогневих випробувань, відомих з [22, 23].

Формування зразків, відбувалося за технологією заводу-виробника. При виготовленні зразків передбачалися глухі отвори для термопар згідно з методикою інтерпретації результатів вимірювання. Після формування, зразки піддавалися операції ущільнення структури бетону на вібростендах. Твердіння і сушка відбувалося на повітрі протягом 30 діб у приміщенні для кондиціювання зразків ПКЗ-2 за температури навколишнього середовища  $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$  та вологості  $55\pm 2\%$ . Перед випробуванням була проведена перевірка зразка на відповідність технічній документації.

З використанням бетонної суміші, з якої були виготовлені фрагменти залізобетонних стін, виготовлені зразки-куби, за допомогою яких була визначена міцність зразка за методикою, відповідає ГОСТ 10180-90 разом з виготовленим стінами. Для формування зразків були використані форми кубів ФК-100, вигляд яких показаний на рис. 3.7.



Рис. 3.7. Форма кубів 2 ФК-100

Бетон заливався у форми, після чого ущільнювався на вібростолі ВМ-6.4 (80кг/2900/0,35...0,55), призначеному для бетонних, асфальтобетонних і розчинів сумішей у формах за ДСТУ 10180, ДСТУ 12801 і ДСТУ 310.4.

Надалі зразки витримувалися в сушильній шафі протягом 28 доби. Для сушіння зразків використовувалася сушильна шафа СНОЛ 3,5.35.3,5/3М.

Означені дослідження повинні були дослідити відповідність бетону класу міцності, який був указаний в програмі випробувань на фрагмент залізобетонної стіни-зразку. Для армування фрагменту залізобетонної стіни-зразку була використана готова арматура виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Технічні характеристики бетону й арматурної сталі відповідні програмі випробувань наведені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

**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	A240С	арматурна сталь	Крок – 200мм; площа поперечного перерізу 0,503 Міцність – 240 МПа
Арматура $d_2 = 16$ мм	A240С	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь	Крок – 200мм; площа поперечного перерізу 0,503 Міцність – 240 МПа
Арматура $d_1 = 16$ мм	A500С	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь	Крок – 200мм; площа поперечного перерізу 0,503 Міцність – 500 МПа

На рис. 3.8 представлена схема розташування термопар у перерізі стінового фрагменту-зразку. Схема розташування термопар відповідає вимогам стандартів ДСТУ Б В.1.1-4-98 і ДСТУ Б В.1.1-19:2007 [22, 23]. Таким чином, на обігрівній поверхні зразка встановлені термопари Т7 – Т11 для вимірювання температури на обігрівній поверхні зразка, термопари Т12 – Т16 для вимірювання середньої температури на необігрівній поверхні, Т17 – Т19 для вимірювання максимальної температури, Т20– Т22 вимірювання температури на робочій арматурі, ближчої до необігрівної поверхні.

На схемі рис 3.8 показані точки розташування термопар у проекційному зв'язку з врахуванням їх видимості на проекціях.

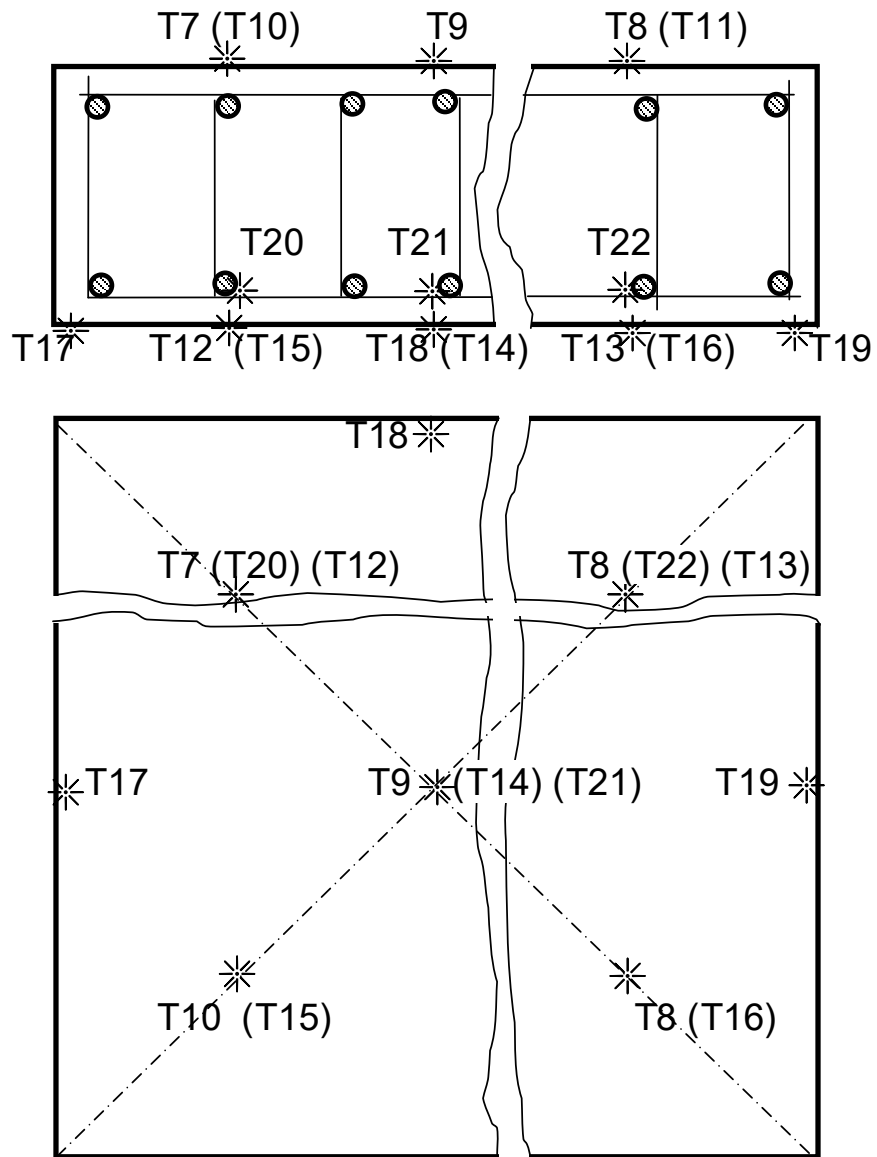


Рис. 3.8. Схема розташування термопар у перерізі залізобетонної стіни-зразку для випробувань.

Температура у кожному з арматурних стержнів визначається як середнє значення температур на кожному із стержнів.

За описаною методикою були виготовлені фрагменти залізобетонної стіни-зразка для проведення випробувань, зображення якого подано на рис. 3.9.





Рис. 3.9. Вигляд фрагменту залізобетонної стіни-зразку для випробувань

На рис. 3.9 видно канали, через які проходять дроти термодатчиків у перерізі стіни згідно зі схемою на рис. 3.8. Для знімання температур з цих датчиків використовувався інтерфейс програмного забезпечення, який контролює та керує температурою у робочому просторі печі, забезпечуючи температурний режим пожежі. Для контролю температур у перерізі стінового елемента означене програмне забезпечення було відповідним чином доповнене персоналом випробувального центру «Пожтест».

**3.2.2. Виготовлення фрагменту стіни-зразку з блоків із легкого бетону для вогневих випробувань.** Відповідно до вимог програми експерименту щодо фрагменту стіни другого типу вона має бути виконана з блоків із легкого бетону. Для блоків фрагменту була застосована бетонна суміш, склад якої мав параметри, які наведені у табл. 3.6. У табл. 3.6 також поданий склад будівельного розчину для скріплення блоків у стіні.

**Склад суміші для виготовлення блоків для стін-зразків другого типу та будівельного розчину**

Назва компоненту	Вміст у пропорціях на 1 м <sup>3</sup> , кг	Допустиме відхилення, кг
Бетонна суміш для виготовлення блоків		
Портландцемент марки «400»	280	10
Пісок кварцовий річкової	680	
Спучений перліт	240	
Вода водопровідна	150	
Суміш для виготовлення будівельного розчину		
Портландцемент марки «400»	90	10
Пісок кварцовий річкової	171	
Вода водопровідна	350	

Бетонна суміш для виготовлення блоків виготовлялася на заводі-виробнику ВАТ “Броварський завод будівельних конструкцій” за ДСТУ Б В.2.7-7-94 „Будівельні матеріали. Вироби бетонні стінові дрібноштучні. Технічні умови”. При цьому використовувалося відповідне технологічне обладнання: дозувальні пристрої, обладнання для формоутворення блоків, та ущільнення у них бетонної суміші (вібростенди та вібростоли), а також сушильні пристрої. На рис. 3.10 показаний зовнішній вигляд готового блоку для виготовлення фрагменту стіни-зразку для випробувань.



Рис. 3.10. Зовнішній вигляд блоку для виготовлення стінового фрагменту-зразку із блоків з легкого бетону

У табл. 3.7 зведені величини основних параметрів стінового фрагменту. Відповідно до вимог програми експерименту щодо даного фрагменту залізобетонної стіни бетон блоків має відповідати класу міцності LC 8/12 (B8). Клас міцності будівельного розчину має відповідати значенню 25.

**Основні параметри стінових фрагментів-зразків для випробувань з блоків із легкого бетону**

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри фрагменту • товщина стіни • ширина стіни • висота стіни	$s$ $l$ $h$	0,19 1,5 3,2	м
Тип бетону блоків	Легкий на заповнювачі із спученого перліту	Клас LC 8/12 (B8)	
Густина бетону	$\rho_B$	800	кг/м <sup>3</sup>
Гранична вологість	$u$	< 3	%
Будівельний розчин	На портландцементі марки «400»	Клас міцності 25	
Густина будівельного розчину у твердому стані	$\rho_P$	1300	кг/м <sup>3</sup>

На рис. 3.11 представлена схема розташування термопар у перерізі фрагменту залізобетонної стіни-зразку. Схема розташування термопар відповідає вимогам стандартів ДСТУ Б В.1.1-4-98 і ДСТУ Б В.1.1-19:2007 [22, 23]. Таким чином, на обігрівній поверхні зразків встановлені: термопари Т7 – Т11 для вимірювання середньої температури на обігрівній поверхні зразка №1, термопари Т12 – Т16 для вимірювання середньої температури на обігрівній поверхні зразка №2, Т17 – Т23 для вимірювання середньої температури на необігрівній поверхні зразка №1; Т24 – Т30 для вимірювання середньої температури на необігрівній поверхні зразка №2; для вимірювання максимальної температури, Т31 – Т34 для вимірювання максимальної температури.

На схемі рис 3.11 показані точки розташування термопар у проекційному зв'язку з врахуванням їх видимості на проекціях.

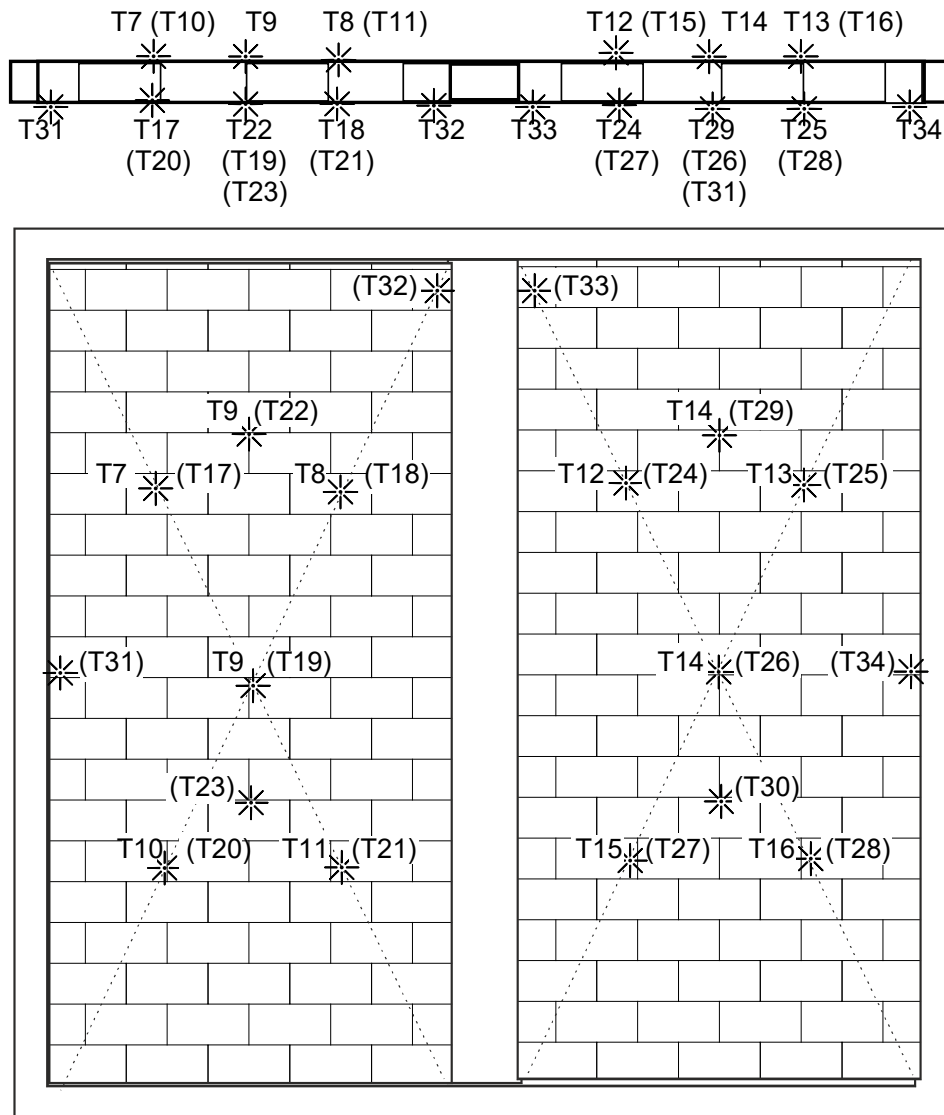


Рис. 3.11. Схема розташування термопар у перерізі фрагментів стін-зразків з блоків із легкого бетону для випробувань.

Для вивчення температурних розподілів у перерізі фрагментів стін-зразків з блоків із легкого бетону у внутрішньому шарі бетону були встановлені додаткові термопари з врахуванням результатів, що були отримані у п. 2.1.2 дійсної роботи і представлені на рис. 2.5 та рис. 2.6. Згідно з цими даними термопари мають бути встановлені на глибині 60 мм від обігрівної поверхні. Схема розташування додаткових термопар у внутрішніх шарах стінових фрагментів-зразків подана на рис. 3.12.

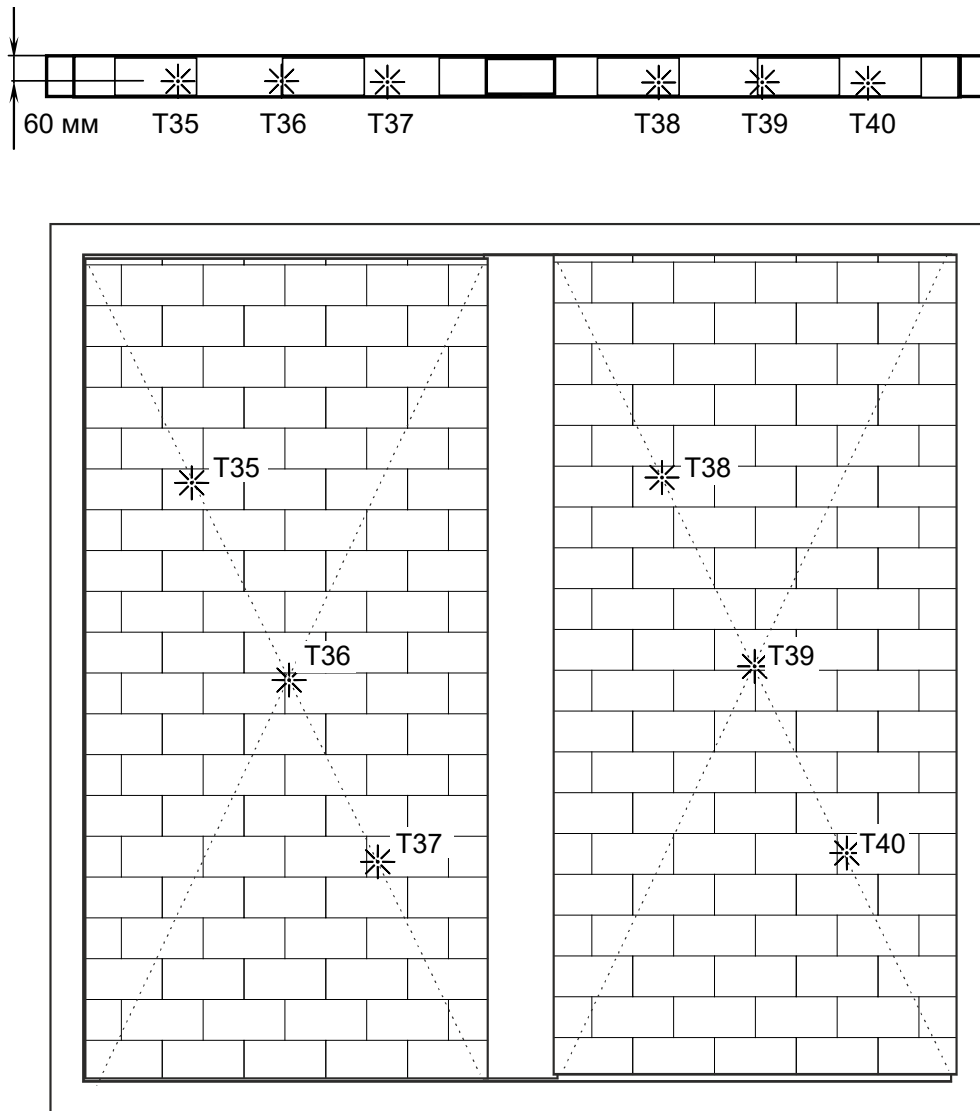


Рис. 3.12. Схема розташування термопар у перерізі фрагментів стін-зразків з блоків із легкого бетону для випробувань.

За описаною методикою були виготовлені фрагменти кам'яної стіни-зразка для проведення випробувань, зображення якого подано на рис. 3.13. На рис. 3.13 також видно канали, через які проходять дроти термодатчиків у перерізі стіни згідно зі схемою на рис. 3.12. Для знімання температур з цих датчиків використовувався інтерфейс програмного забезпечення, який контролює та керує температурою у робочому просторі печі, забезпечуючи температурний режим і програмне забезпечення випробувального центру «Пожтест».



Рис. 3.13. Вигляд фрагменту стіни-зразку з блоків із легкого бетону для випробувань

### **3.3. Методика вогневих випробувань стінових фрагментів-зразків**

**3.3.1. Методика підготовки обладнання та фрагменту залізобетонної стіни-зразка до випробувань.** В процесі підготовки до випробувань, згідно з п.7.3 ДСТУ Б В.1.1-19:2007 зразок був шарнірно закріплений на нижньому краю і навантажений розподіленим навантаженням  $15 \text{ т/м}^2$  на верхній край зразку (без врахування власної ваги). Навантаження дослідного зразка відбувалося за допомогою трьох гідравлічних домкратів. Опорна конструкція закріплюється в передній стіні печі за допомогою спеціальних затискачів. Схема закріплення зразка та його навантаження показані на рис. 3.1. Бокові краї зразку не закріплювалися.

Величина механічного навантаження, що прикладалася на початковому етапі випробувань є максимальним навантаженням, що можна реалізувати на даній установці.

Для запобігання виходу гарячих газів з печі щілини та отвори між рамою та стінками печі були ізольовані шаром мінеральної вати завтовшки 120 мм та густиною  $120 \text{ кг/м}^3$ . Отвори оглядових люків були закриті пінобетонними плитами товщиною 150 мм та густиною  $450 \text{ кг/м}^3$ .

Вигляд установки, що готова до випробувань, поданий на рис. 3.9.

**3.3.2. Методика підготовки обладнання та зразків фрагменту стіни-зразка з блоків із легкого бетону до випробувань.** Зразки були змонтовані у опорній конструкції з сталевого швелеру №27. В процесі підготовки до випробувань, згідно з п.7.3 ДСТУ Б В.1.1-19:2007 зразок був шарнірно закріплений на нижньому краю і навантажений розподіленим навантаженням  $15 \text{ т/м}^2$  на верхній край зразку (без врахування власної ваги).

Для визначення максимального рівня навантаження була використана спеціальна розрахункова методика, що описана нижче.

Також для запобігання виходу гарячих газів з печі щілини та отвори між рамою та стінками печі були ізольовані шаром мінеральної вати завтовшки 120 мм та густиною  $120 \text{ кг/м}^3$ . Отвори оглядових люків були закриті пінобетонними плитами товщиною 150 мм та густиною  $450 \text{ кг/м}^3$ .

Вигляд установки, що готова до випробувань, поданий на рис. 3.12.

**3.3.3. Методика проведення випробувань.** Випробування проводились при температурі  $18^{\pm 1} \text{ °C}$  та відносній вологості повітря 55%, що відповідає вимогам [22, 23].

Проведення випробувань фрагментів стін-зразків здійснювалося за методом, що регламентований [22, 23]. Метод випробувань полягає у визначенні проміжку часу від початку випробування за температурним режимом згідно з [22] за вогневого впливу з обігрівної сторони фрагменту стіни-зразка [23].

Межа вогнестійкості конструкції визначається за формулою [22]:

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

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  $t_i$ , °C;  $t_i$  - 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  $t_i$ , °C.

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:

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

де:  $A_{min}$  - інтегральне значення мінімально допустимої температури  $T_{min}$  для інтервалу часу від 0 до  $t_{mes}$ , °C· хв.

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

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

де:  $T_{min i}$  - значення мінімально допустимої температури  $T_{min}$ , що відповідає часу  $t_i$ , °C.

Температуру  $T_{min}$  визначають за формулою:

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

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.

**3.3.4. Методика визначення початкового навантаження на фрагмент стіни-зразок з блоків із легкого бетону.** Зазвичай максимальне навантаження може бути визначене за допомогою прямого випробування. Оскільки таке випробування пов'язане з високими навантаженнями, що не можуть бути реалізованими на наявному випробувальному обладнанні, для визначення руйнуючих навантажень застосований метод комп'ютерного моделювання. В якості математичної моделі для описання процесу випробування на міцність



досліджуваної стіни другого типу, виконаної з блоків із легкого бетону, використаний метод кінцевих елементів у комбінації з теорією міцності для визначення положення та орієнтації тріщин, теорією пластичності для описання непружних деформацій бетону. Перелік математичних моделей, що застосовані для розрахунку поданий у табл. 3.8.

Таблиця 3.8

**Основні розрахункові математичні моделі напружено-деформованого стану**

<i>Особливість поведінки залізобетону</i>	<i>Використовувана математична модель</i>
Базові рівняння НДС.	Вирішуючі рівняння МКЕ.
Пластична деформація бетону й арматурної сталі.	Багатошарова модель Беселінга асоціативної теорії пластичності [104].
Фізична й геометрична нелінійність поведінки залізобетону.	Ітеративний метод Ньютона – Рафсона [104].
Критерій міцності бетону.	Складений критерій Віллема й Варнке [104].
Механічні та термомеханічні властивості бетону й арматурної сталі.	Згідно із Eurocode 6 EN 1996-1-1: 2004. [60].

На рис. 3.14 показані відповідна розрахункова та кінцево-елементна схеми досліджуваної стіни.

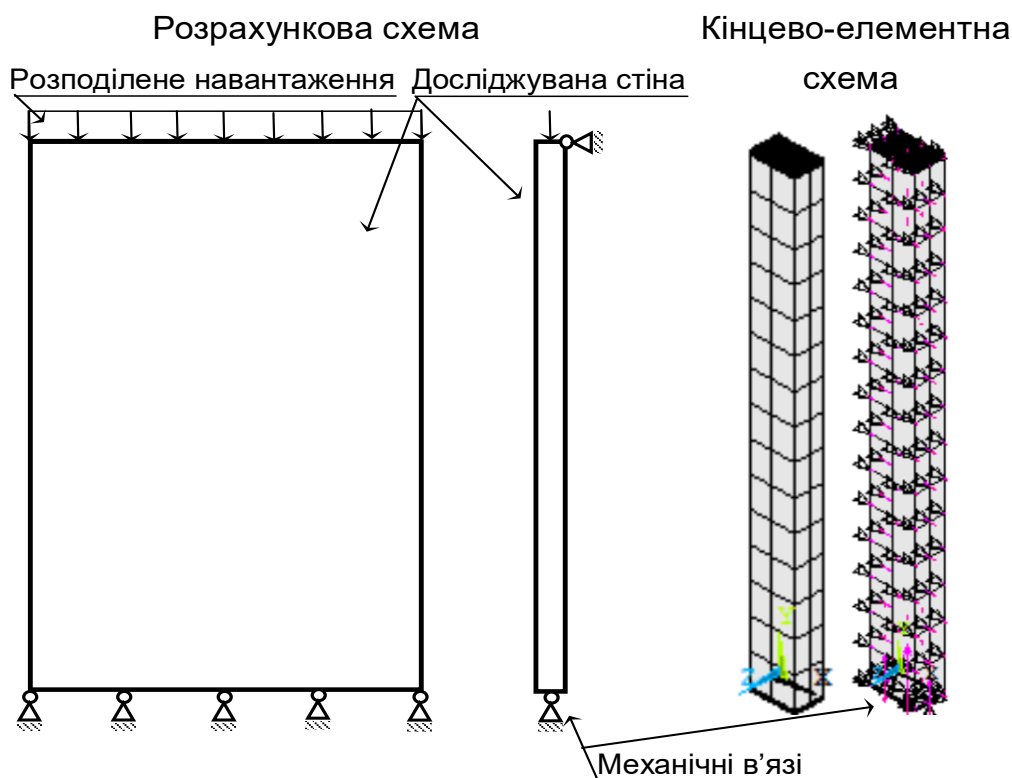


Рис. 3.14. Розрахункова та кінцево-елементна схема досліджуваного фрагменту стіни з блоків із легкого бетону

На рис. 3.15 показана діаграма деформування, що описує механічні властивості матеріалу досліджуваної стіни [40].

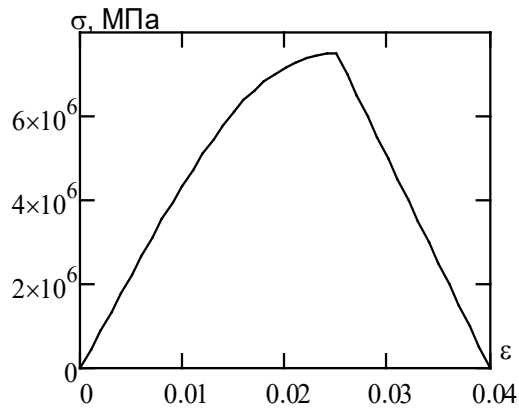


Рис. 3.15. Діаграма деформування легкого бетону на пористому заповнювачі LC 8/12 (B8).

Для вирішення задачі використано розрахунок з огляду на геометричну та фізичну нелінійності за умов покрокового навантаження.

Результати міцнісного розрахунку подані на рис. 3.16 у вигляді графіків відповідно поздовжнього та поперечного переміщень.

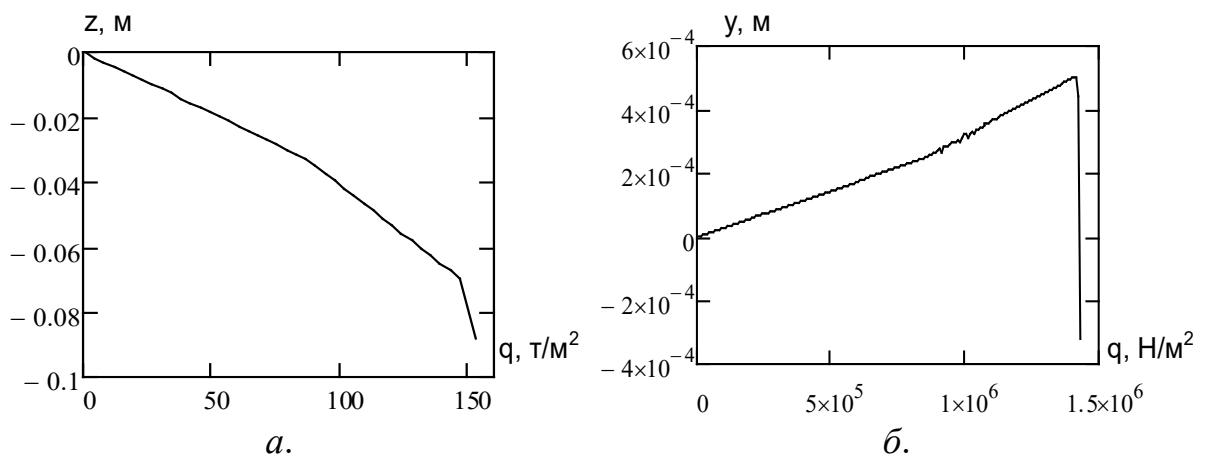


Рис. 3.16. Графіки максимального поздовжнього (а) та поперечного переміщення (б) стінового фрагменту при його навантаженні до повного руйнування.

Враховуючи отриманий результат можна помітити, що руйнування стінового фрагменту відбувається внаслідок втрати стійкості при переході у стан поздовжнього згину з утворенням локальної зони пластичної деформації при навантаженні  $150 \text{ т/м}^2$ .

Таким чином, діюче навантаження при випробуванні фрагменту стіни з блоків із легкого бетону, враховуючи коефіцієнт запасу, має бути  $50 \text{ т/м}^2$ . Тому прикладаємо максимально можливе навантаження  $15 \text{ т/м}^2$ .

## РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

### 4.1. Результати вогневих випробувань залізобетонних стінових фрагментів-зразків

**4.1.1. Результати попередніх досліджень міцності бетону залізобетонних стінових фрагментів-зразків.** Використовуючи методику, що описана у діючому стандарті [112], була досліджена міцність бетону, з якого виготовлений стіновий фрагмент-зразок. Процес випробувань показаний на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Вигляд кубічного бетонного зразку після випробувань на міцність.

Процес випробувань відбувався з одночасним побудуванням діаграми деформування. Побудовані діаграми подані на рис. 4.2.

В табл. 4.1 подані дані щодо кубічної міцності зразків. Також у даній таблиці подані отримані відхилення кубічної міцності.

Враховуючи дані табл. 4.1 можна зазначити, що бетон, використаний для виготовлення залізобетонних стінових фрагментів-зразків для випробування відповідає класу міцності С 30/35 (В30).

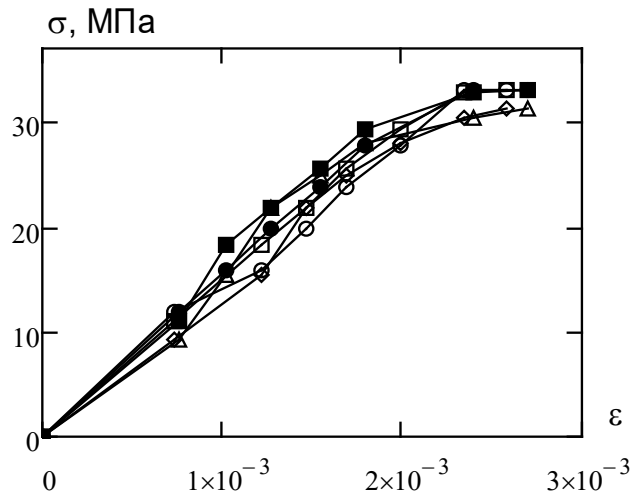


Рис. 4.2. Діаграми деформування, отримані для шести випробуваних бетонних зразків-кубів.

Таблиця 4.1.

**Результати випробувань на міцність бетонних зразків**

Зразок	Початковий модуль пружності, $E_b$ $\times 10^4$ МПа	Кубічна міцність бетону, $f_{cd}$ , МПа	Відповідний клас міцності бетону	Імовірність вимірювання міцності, %
№ 1	1,8	33	C30/35	100
№ 2	1,2	31	C30/35	
№ 3	1,05	30	C30/35	
№ 4	1,12	34	C30/35	
№ 5	1,3	32	C30/35	
№ 6	1,06	31	C30/35	

У результаті вимірювання міцності встановлена відповідність класу міцності бетону для виготовлення стінового фрагменту-зразка. Бетон відповідає класу міцності C30/35 (B30).

Шляхом гідростатичного зважування бетонних зразків-кубів була визначена густина бетону, з якого виготовлені фрагменти залізобетонної стіни для випробування. У результаті середня густина зразків склала  $2307,5 \text{ кг/м}^3$ , що відповідає вимогам табл. 3.3 дійсної роботи.

**4.1.2. Результати вогневих випробувань залізобетонних стінових-фрагментів-зразків.** Використовуючи експериментальні методики, що описані у попередньому розділі були проведені відповідні вогневі випробування двох залізобетонних стінових фрагментів-близнюків. Після проведення випробувань зразки мали вигляд, який показаний на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Вигляд залізобетонного стінового фрагменту-зразку №1 після проведення вогневих випробувань.

Випробувані зразки були піддані візуальному огляду з метою виявлення ушкоджень унаслідок вогневої дії у печі установки для випробувань. Візуальний огляд показав, що обидва зразки були пошкоджені. По всій поверхні фрагменту спостерігається розвинена система тріщин, що утворилися внаслідок дії тиску пари у порах бетону, а також неоднакового розширення цементного каменю та крупного заповнювача. По поверхні фрагментів спостерігалось відколювання шару бетону. Поверхня бетону стінових фрагментів-зразків має сліди вологи, яка випаровувалася з неї. Крім цього, спостерігалися одиничні воронки та каверни, які зумовлені наявними локальними дефектами бетону. На рис. 4.4 показаний вигляд вказаних ушкоджень.



*a.*

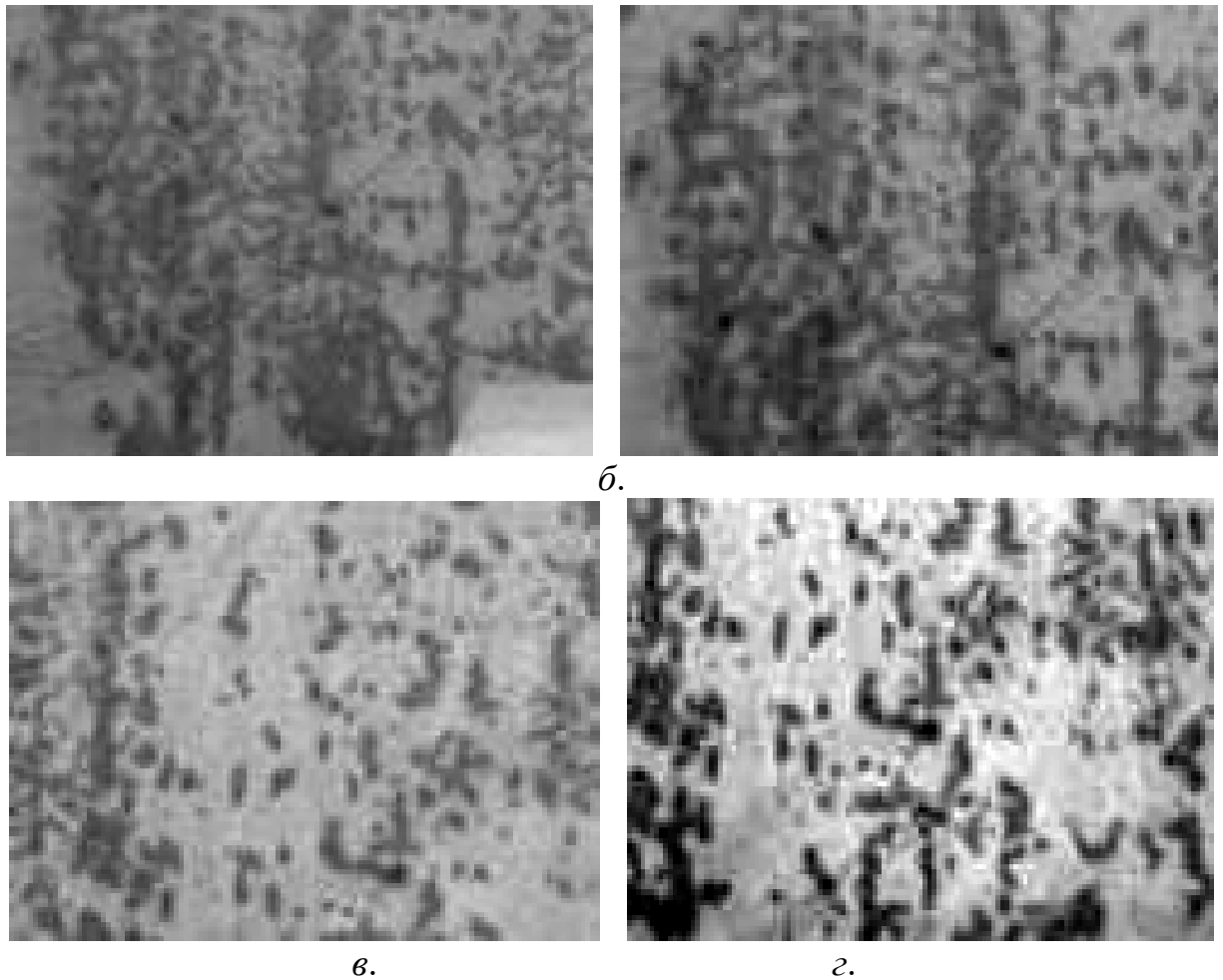


Рис. 4.4. Ушкодження залізобетонних стінових фрагментів-зразків після вогневих випробувань:

*a* – тріщинувата структура поверхні; *б* – відколювання поверхні; *в* – сліди вологи, що випарилася крізь пори; *г* – локальні ушкодження поверхні

Результати вимірювання температури у камері печі показані на рис. 4.5.

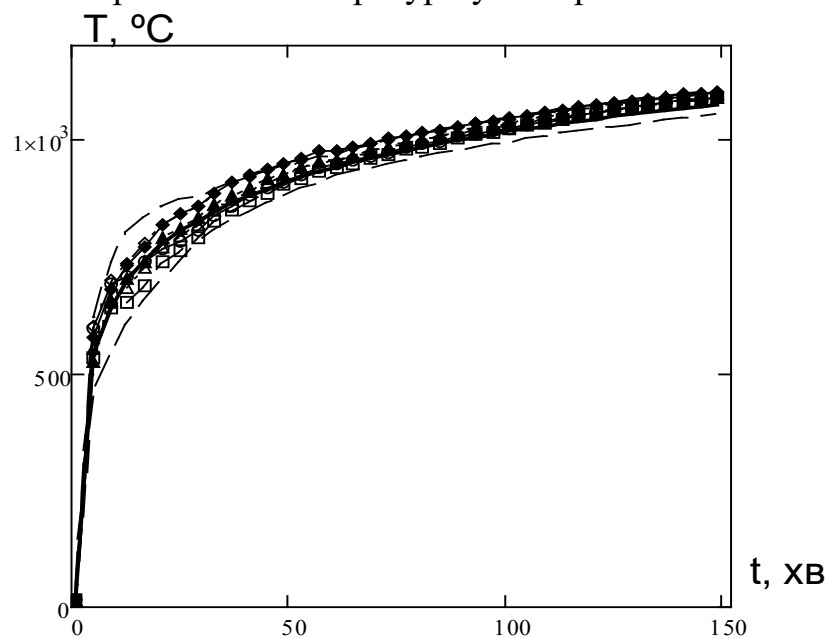


Рис. 4.5. Показники термопар у камері печі:

□□□ – показники 1 термопар; ---- – показники 2 термопар;  
△△△ – показники 3 термопар; ◇◇◇ – показники 4 термопар;  
◆◆◆ – показники 5 термопар; ····· – показники 6 термопар;  
— — — — — стандартна температурна крива пожежі; — — — — — максимально та мінімально допустиме відхилення температури у печі від стандартного режиму

Графіки на рис. 4.5 показують що температура у камері печі має достатньо рівномірне розподілення, що вказує на добрі умови експерименту. Для аналізу відповідності температурного режиму у печі до стандартного режиму пожежі згідно зі стандартом [22] використовують середнє значення температури за показниками всіх термопар у просторі печі.

На рис. 4.6 подана залежність середньої температури від часу випробування разом із імовірними відхиленнями показників термопар, що допускається стандартами [22, 23], а також із врахуванням інструментальної похибки, що вказана у атестаційному паспорті на термопарі.

Дані на рис. 4.6 свідчать про те, що режим випробувань повністю відповідає вимогам стандартів України щодо випробувань на вогнестійкість несучих стін.

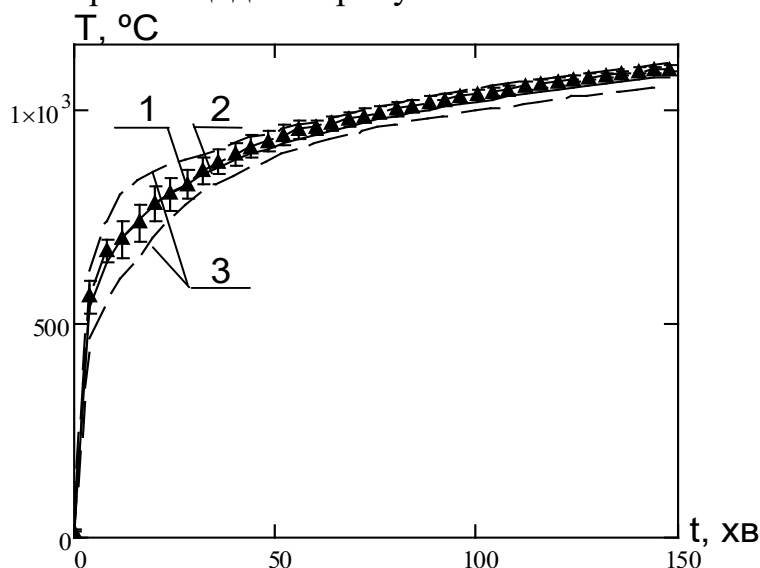


Рис. 4.6. Температурний режим випробувань в печі:

1 – середня температура в печі, 2 – стандартна температурна крива, 3 – допустимі відхилення температурного режиму.

Методика проведених вогневих випробувань дала змогу провести вимірювання температури на поверхнях зразків. На рис. 4.7 подані залежності температур у контрольних точках обігрівної поверхні залізобетонних стінових фрагментів-зразків від часу випробувань згідно зі схемою розташування термопар на рис. 3.8.

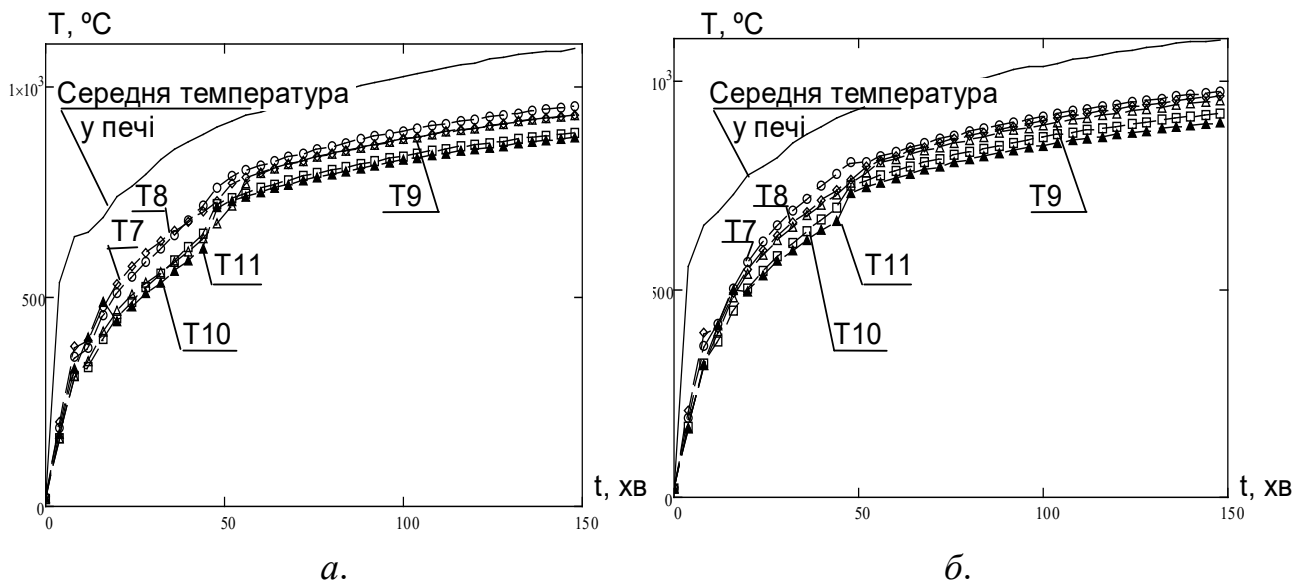


Рис. 4.7. Показники термопар на обігрівній поверхні залізобетонних стінових фрагментів-зразків №1 (а) та №2 (б).

На рис. 4.8 подані залежності температур у внутрішніх контрольних точках необігрівної поверхні залізобетонних стінових фрагментів-зразків від часу випробувань згідно зі схемою розташування термопар на рис. 3.8.

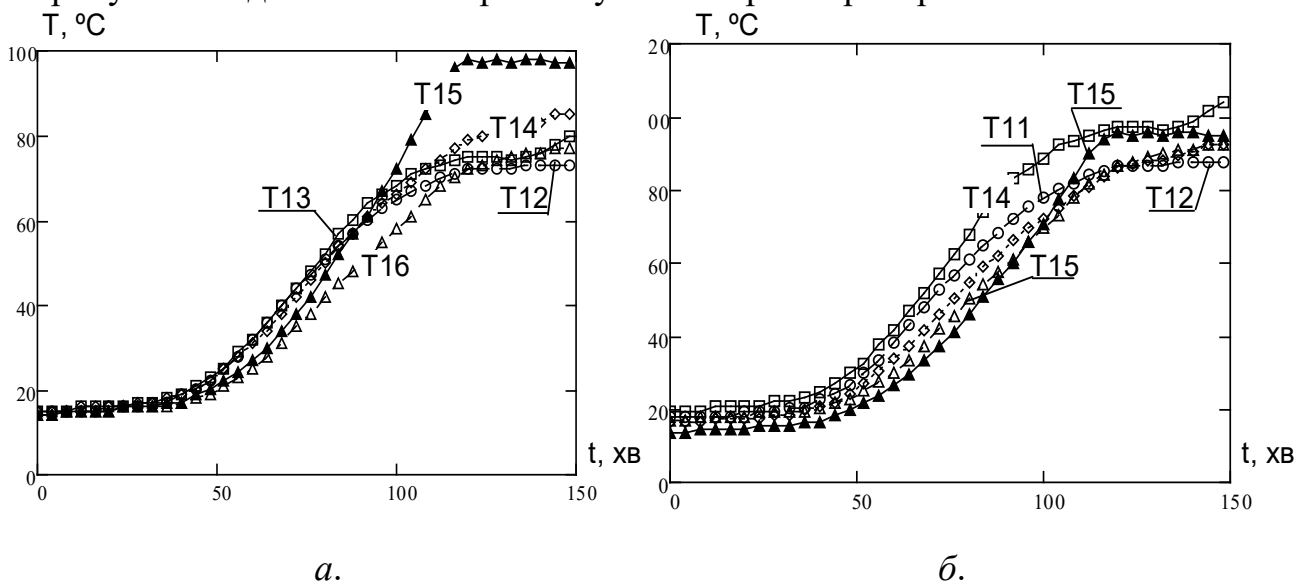
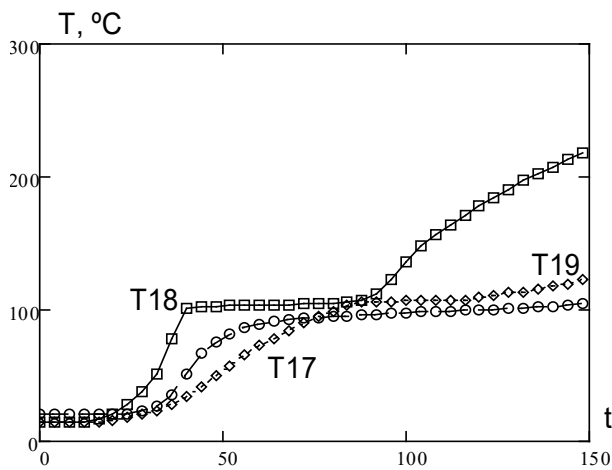


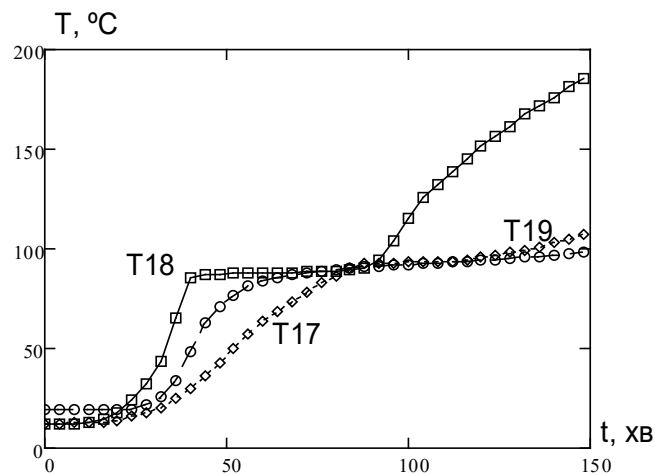
Рис. 4.8. Показники термопар на необігрівній поверхні залізобетонних стінових фрагментів-зразків №1 (а) та №2 (б).

На рис. 4.9 подані залежності температур у крайових контрольних точках необігрівної поверхні залізобетонних стінових фрагментів-зразків від часу випробувань згідно зі схемою розташування термопар на рис. 3.8.





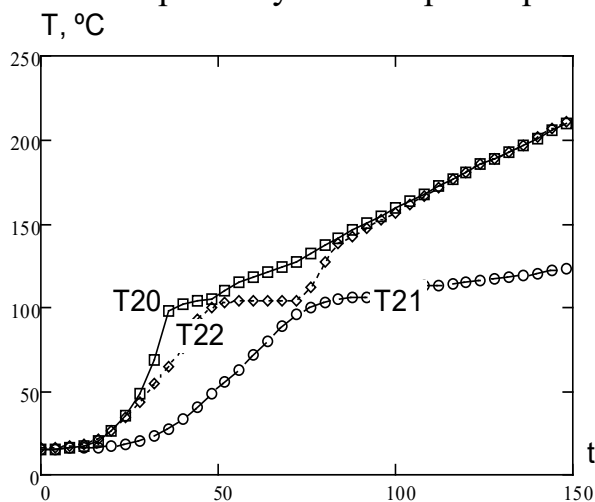
*a.*



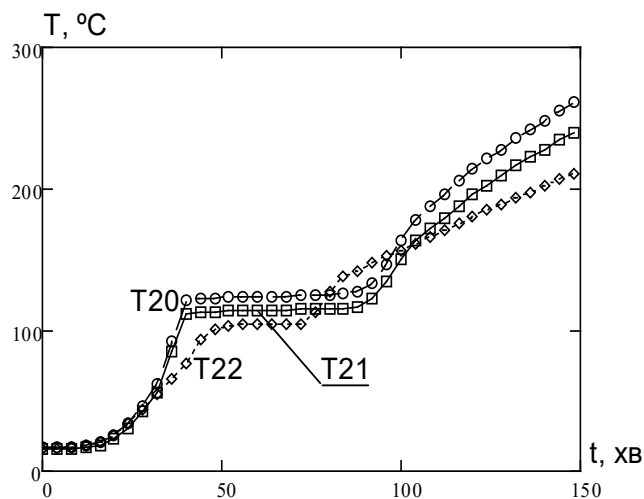
*б.*

Рис. 4.9. Показники термопар на необігрівній поверхні залізобетонних стінових фрагментів-зразків №1 (*a*) та №2 (*б*).

На рис. 4.10 подані залежності температур у контрольних точках на арматурі залізобетонних стінових фрагментів-зразків від часу випробувань згідно зі схемою розташування термопар на рис. 3.8.



*a.*



*б.*

Рис. 4.10. Показники термопар у контрольних точках на арматурі залізобетонних стінових фрагментів-зразків №1 (*a*) та №2 (*б*).

На рис. 4.11 подані результати вимірювання вертикальних деформацій стінових фрагментів-зразків у двох контрольних точках по одній з кожного краю зразка.

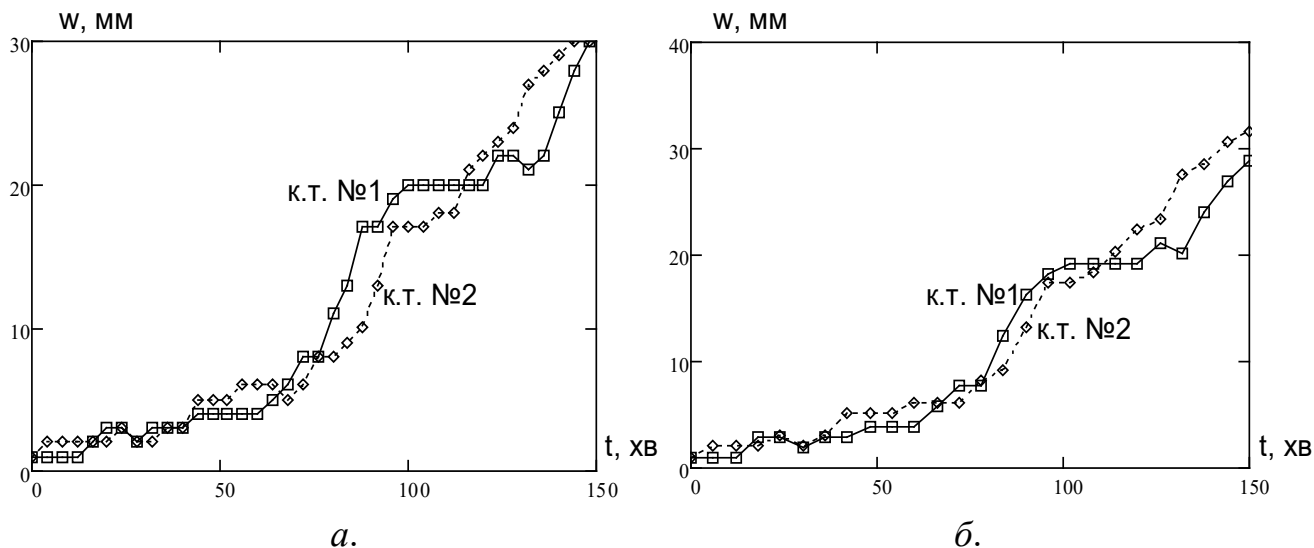


Рис. 4.11. Вертикальні переміщення у контрольних точках (к.т.) залізобетонних стінових фрагментів-зразків №1 (а) та №2 (б).

Аналізуючи результати досліджень поданих на рис. рис. 4.5 – 4.11 можна відзначити такі особливості. Під час випробувань настання жодного з граничних станів за ознаками, що наведені у відповідних стандартах України [22, 23] щодо випробувань стінових фрагментів не спостерігалось. Нагрів стінових фрагментів під час випробувань відповідає теоретичним уявленням про даний процес. В процесі випробувань стіновий фрагмент мав вигин у бік, протилежний обігрівній поверхні. Температурні криві нагрівання не обігрівної поверхні мали характерну ділянку із сталим значенням температури близько 100 °С, пов'язану із випаровуванням вільної вологи у порах бетону.

Температури, які вимірювалися у печі та на обігрівній поверхні мали невеликий розкид, що підтверджують добру відтворюваність температурного режиму випробувань. Це означає що рух пічних газів та інтенсивне пароутворення несуттєво впливає на процес вимірювання.

Також незначний розкид значень спостерігався при вимірюваннях температури на необігрівній поверхні.

Помітний розкид мав місце при вимірюваннях температури у крайових точках необігрівної поверхні та на арматурних стержнях. Це пояснюється суттєвою залежністю результатів вимірювання від процесів деградації цементного каменю та його розтріскуванням.

Також, слід зазначити, що розкид значень вертикальних переміщень стінових фрагментів-зразків мав невелике значення.

На рис. 4.12 показані графіки середніх температур з відповідними відхиленнями, які були отримані для контрольних точок на обігрівній та необігрівній поверхнях залізобетонних стінових фрагментів-зразків, а також на арматурних стержнях. На рис. 4.13 подані графіки розкиду температур у контрольних шарах у порівнянні між випробуваними зразками.

Аналізуючи графіки на рис. 4.12, можна побачити, що найбільші відхилення виникають на інтервалі з 100 хвилини по 150 хвилину випробування. Це пов'язано з прогріванням внутрішніх шарів зразків до високої температури, коли відбувається інтенсивне розтріскування та деструкція бетону. Інша ділянка

великих відхилень на інтервалі з 90 по 140 хвилину, що пов'язана з протіканням реакцій розкладання цементного каменя.

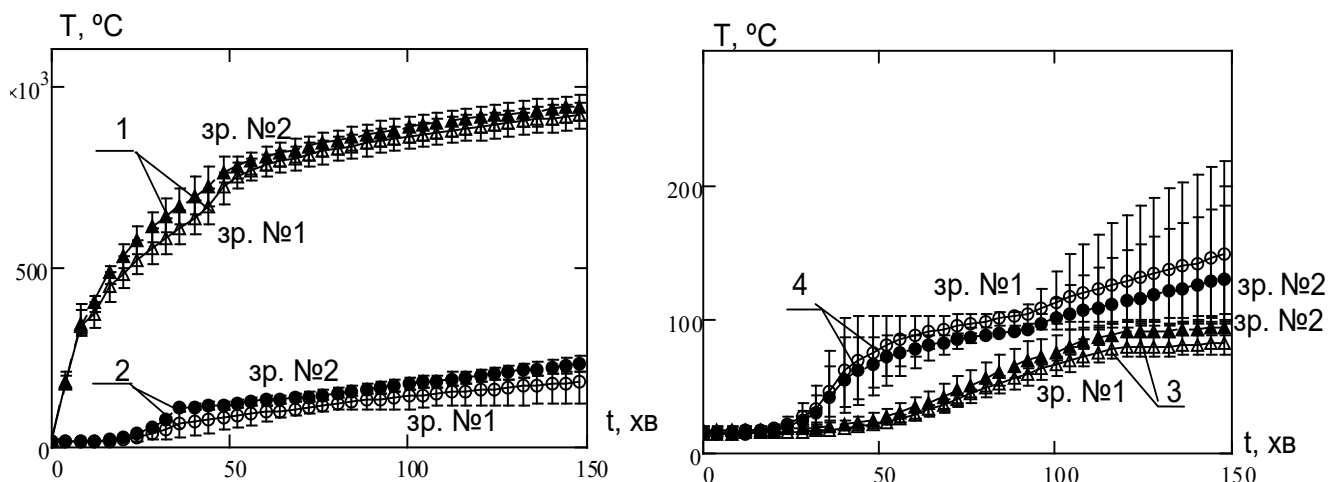


Рис. 4.12. Середня температура у контрольних шарах стінових фрагментів-зразків під час випробувань із відхиленнями:  
 1 – обігрівна поверхня; 2 – необігрівна поверхня; 3 – необігрівна поверхня (додаткові термопари для визначення максимальної температури); 4 – арматурні стержні.

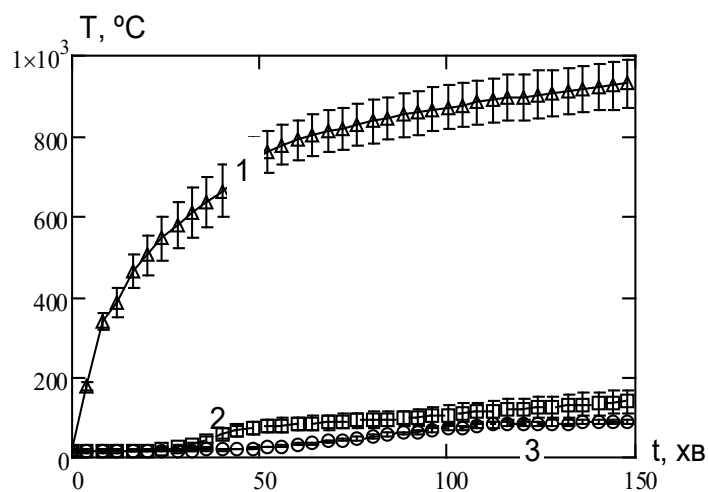


Рис. 4.13. Середня температура у контрольних шарах стінових фрагментів-зразків №1 та №2 під час випробувань із відхиленнями:  
 1 – обігрівна поверхня; 2 – арматурні стержні; 4 – арматурні стержні.

На рис. 4.14 показані графіки вертикальних переміщень з відповідними відхиленнями, які були отримані для контрольних точок на торцях залізобетонних стінових фрагментів-зразків.

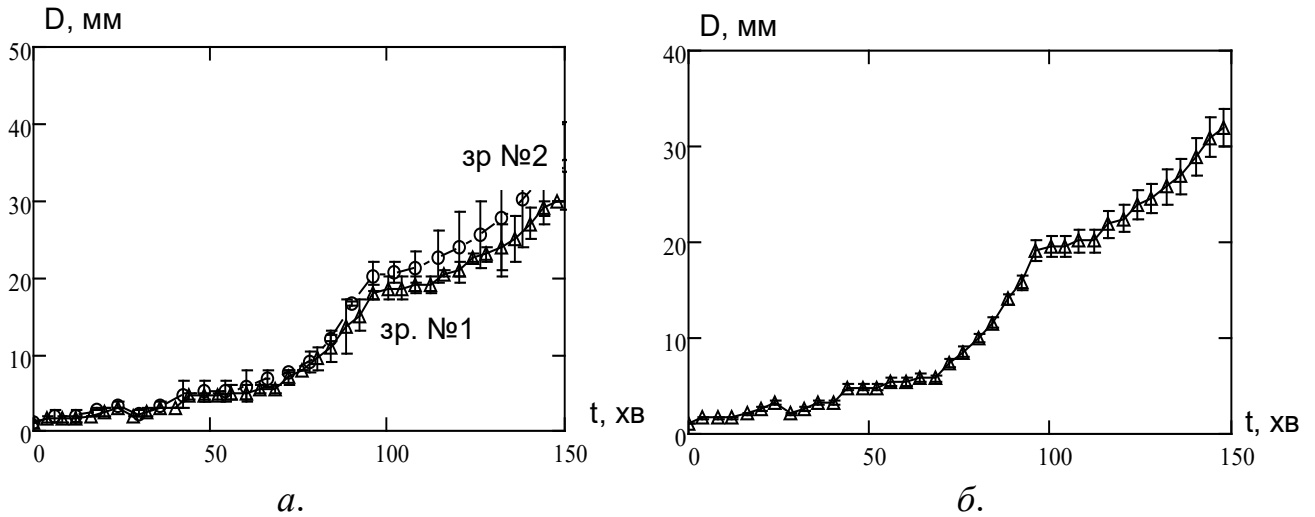


Рис. 4.14. Середні вертикальні переміщення з відхиленнями у залізобетонних стінових фрагментах-зразків №1 та №2 (а) та середнє вертикальне переміщення з відхиленням для обох зразків (б).

Маючи вищеписану статистику вимірювань для двох залізобетонних стінових фрагментів-зразків можна визначити статистичні показники результатів проведеного випробування. У якості основного статистичного показника була визначена дисперсія відтворюваності за формулою [105]:

$$S_{\text{cp}}^2 = \frac{1}{d(n-1)} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^d \left[ \frac{y_{kj}^e - \bar{y}_k^e - \delta_{\text{вим}}}{\bar{y}_k^e} \right]^2. \quad (4.1)$$

$y_{kj}^e$  – поточне експериментальне значення з вибірки;

$\delta_{\text{вим}}$  = допустима похибка вимірювання згідно з [105].

У табл. 4.2 подані значення дисперсії температурних показників для контрольних шарів.

Дані табл. 4.2 вказують на помітну розбіжність експериментальних даних, проте вона є несуттєвою у межах допустимої похибки.

Таблиця 4.2

**Параметри відтворюваності вимірювань температури**

Параметр	Контрольний шар вимірювання температури			
	Обігрівна поверхня	Необігрівна поверхня (середня температура)	Необігрівна поверхня (максим. температура)	Арматурні стержні
Зразок №1				
Максимальне відхилення від середнього значення, °С	112,2	20,2	52,2	45,8
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	5,2	12,4	15,2	14,2
Дисперсія відтворюваності, $S_{ad}^2$	2,4	1,2	8,5	9,75
Зразок №2				
Максимальне відхилення від середнього значення, °С	100,7	14,7	42,3	21,2
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	4,8	12,1	14,9	9,1
Дисперсія відтворюваності, $S_{ad}^2$	1,99	1,2	6,07	4,2

У табл. 4.3 подані значення дисперсії температурних показників для контрольних шарів.

Таблиця 4.3

**Параметри відтворюваності вимірювань вертикальних переміщень**

Зразок	Максимальне відхилення від середнього значення, мм	Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	Дисперсія відтворюваності
Зразок №1	3,5	7,9	0,254
Зразок №2	4,64	9,6	0,457

Дані табл. 4.2 та табл. 4.3 показують добру відтворюваність результатів вимірювання і те що їх можна вважати достовірними.

**4.2. Результати вогневих випробувань стінових фрагментів-зразків з блоків із легкого бетону**

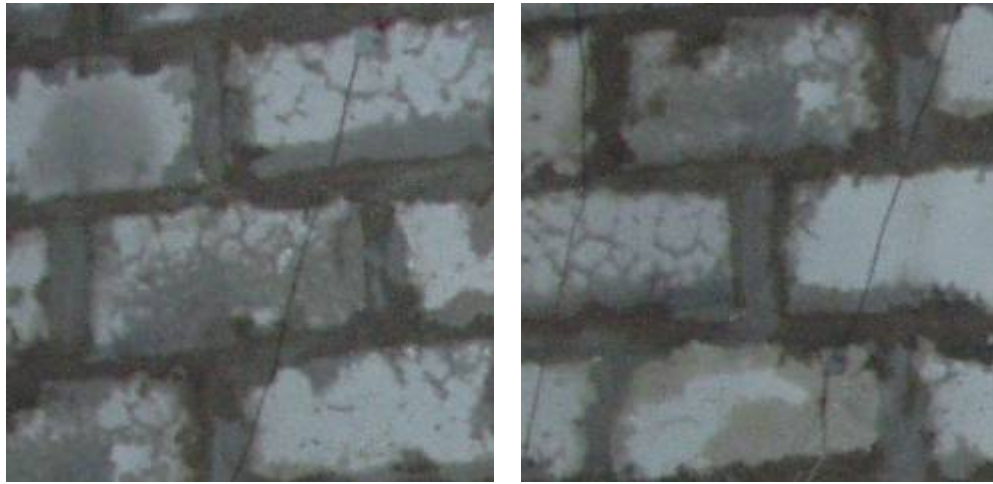
Використовуючи експериментальні методики, що описані у попередньому розділі були проведені відповідні вогневі випробування двох стінових фрагментів-

близнюків з блоків із легкого бетону. Після проведення випробувань зразки мали вигляд, який показаний на рис. 4.15.

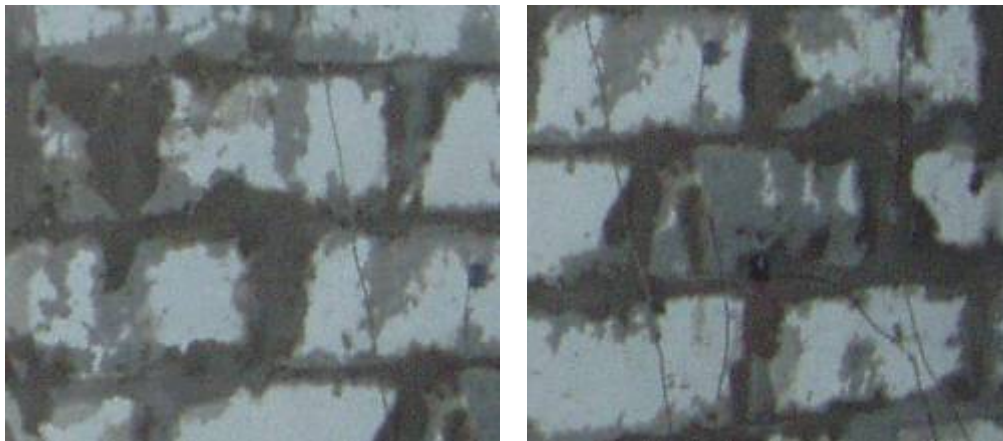


Рис. 4.15. Вигляд стінових фрагментів-зразків №1 та №2 з блоків із легкого бетону після проведення вогневих випробувань.

Випробувані зразки були оглянуті з метою виявлення ушкоджень унаслідок вогневої дії у печі установки для випробувань. Проведений огляд показав, що обидва зразки були пошкоджені. По всій поверхні зразків для випробувань спостерігається розвинена система тріщин, що утворилися внаслідок дії тиску пари у порах бетону, а також неоднакового розширення цементного каменю та будівельного розчину. По поверхні блоків спостерігалось часткове відколювання поверхневого шару бетону. Поверхня бетонних блоків та шви між ними випробуваних стінових фрагментів-зразків має сліди вологи, яка випаровувалася під час випробувань. Також, спостерігалися одиничні воронки та каверни, які зумовлені наявними локальними дефектами бетону блоків та відшарування. На рис. 4.16 показаний вигляд вказаних ушкоджень.



*а.*



*б.*

Рис. 4.16. Ушкодження залізобетонних стінових фрагментів-зразків після вогневих випробувань:

*а* – тріщинувата структура поверхні; *б* — локальні ушкодження поверхні

Результати вимірювання температури у камері печі показані на рис. 4.17.

Графіки на рис. 4.17 показують що температура у камері печі має достатньо рівномірне розподілення, що вказує як і у першому випадку на добрі умови експерименту. Для аналізу також як і для попередніх досліджень при дослідженні відповідності температурного режиму у печі до стандартного режиму пожежі згідно зі стандартом [22, 23] використовують середнє значення температури за показниками всіх термопар у просторі печі.

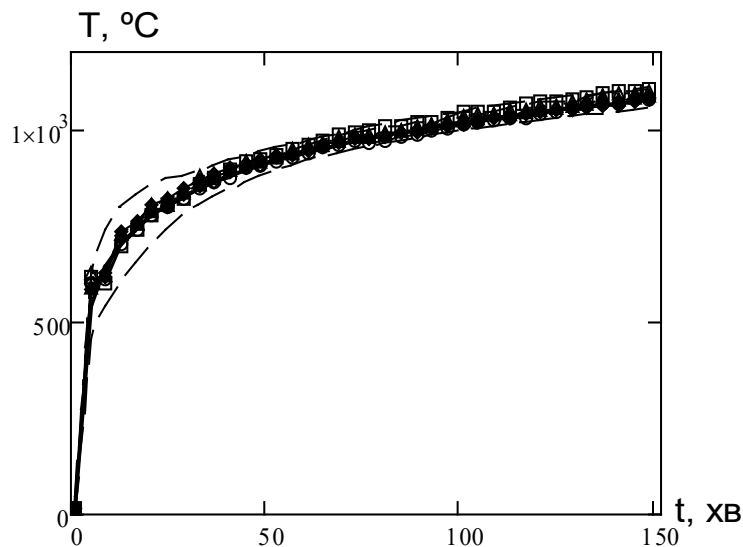


Рис. 4.17. Показники термопар у камері печі:

□□□ — показники 1 термопари;    - - - - - — показники 2 термопари;  
 ▲▲▲ — показники 3 термопари;    ◇◇◇ — показники 4 термопари;  
 ◆◆◆ — показники 5 термопари;    ××× — показники 6 термопари;  
 — — — — — — стандартна температурна крива пожежі;    - - - — максимально та мінімально допустиме відхилення температури у печі від стандартного режиму

На рис. 4.18 подана залежність середньої температури від часу випробування разом із імовірними відхиленнями показників термопар, що допускається стандартами [22, 23], а також із врахуванням інструментальної похибки, що вказана у атестаційному паспорту на термопари..

Дані на рис. 4.18 свідчать про те, що режим випробувань повністю відповідає вимогам стандартів України щодо випробувань на вогнестійкість залізобетонних несучих стін.

Згідно із розробленою методикою проведення вогневих випробувань були проведені вимірювання температури на поверхнях зразків. На рис. 4.19 подані залежності температур у контрольних точках обігрівної поверхні стінових фрагментів-зразків з блоків із легкого бетону від часу випробувань згідно зі схемою розташування термопар на рис. 3.11.



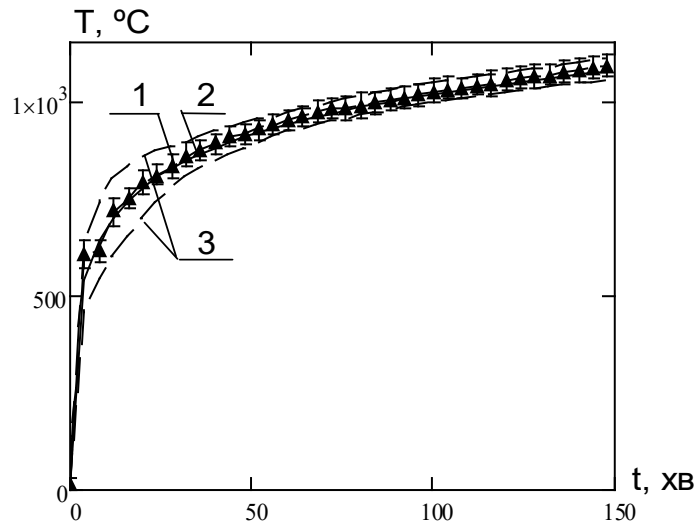


Рис. 4.18. Температурний режим випробувань в печі:  
 1 – середня температура в печі, 2 – стандартна температурна крива, 3 – допустимі відхилення температурного режиму.

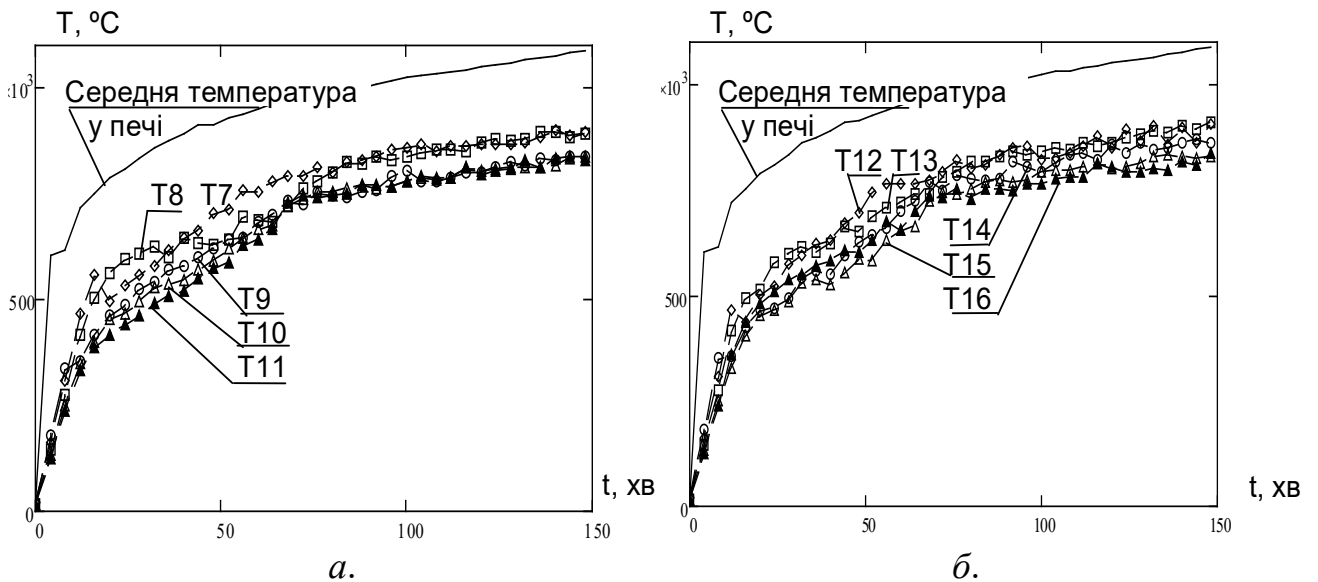
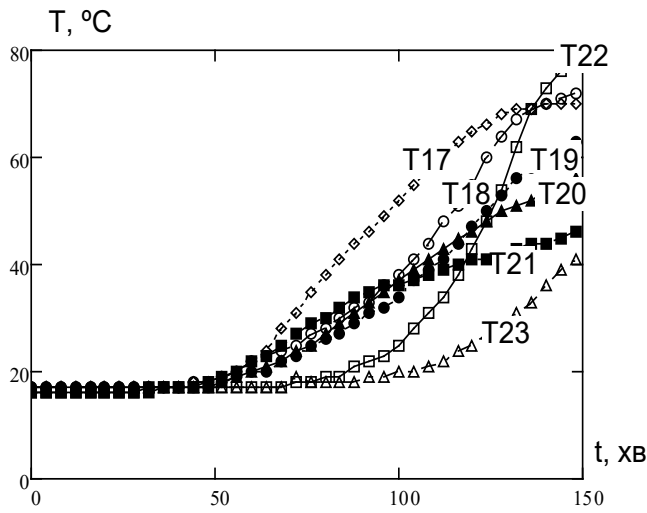
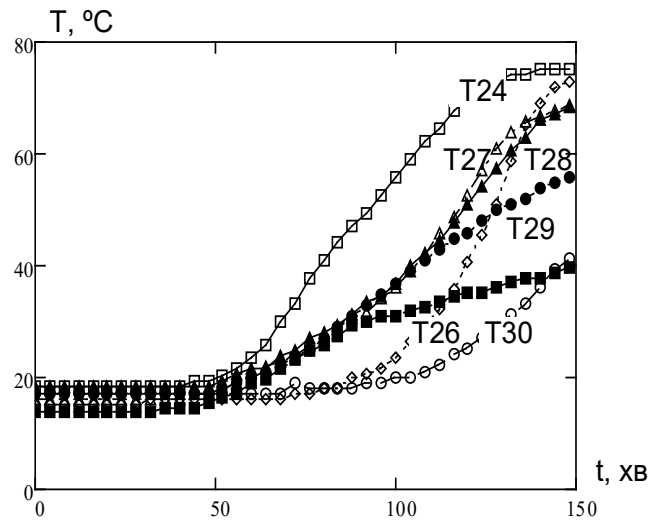


Рис. 4.19. Показники термодпар на обігрівній поверхні стінових фрагментів-зразків №1 (а) та №2 (б) з блоків із легкого бетону.

На рис. 4.20 подані залежності температур у контрольних точках необігрівної поверхні залізобетонних стінових фрагментів-зразків від часу випробувань згідно зі схемою розташування термодпар на рис. 3.11.



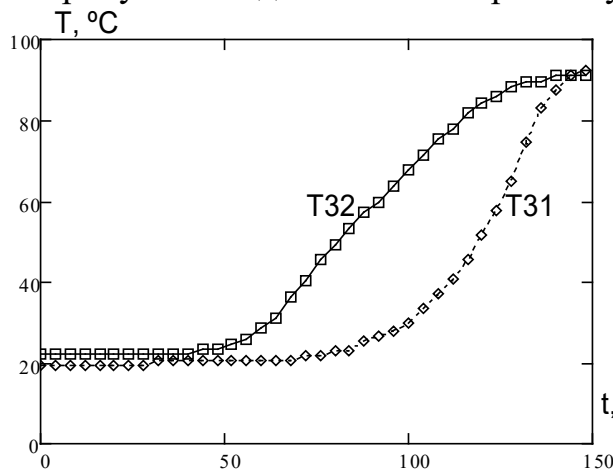
*a.*



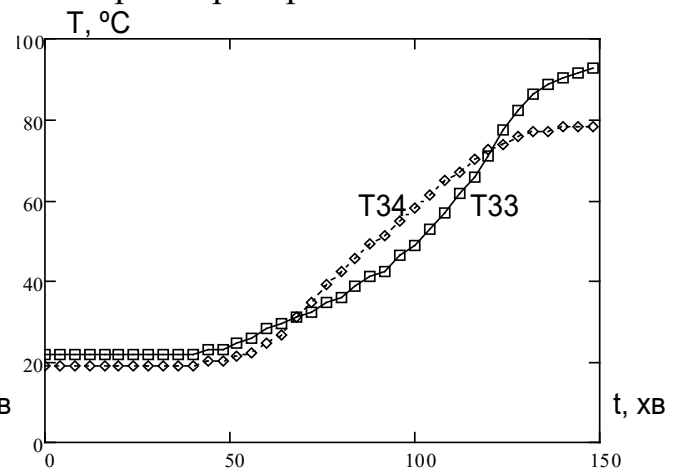
*б.*

Рис. 4.20. Показники термопар на необігрівній поверхні стінових фрагментів-зразків №1 (*a*) та №2 (*б*) з блоків із легкого бетону.

На рис. 4.21 подані залежності температур у крайових контрольних точках необігрівної поверхні стінових фрагментів-зразків з блоків із легкого бетону випробувань згідно зі схемою розташування термопар на рис. 3.11.



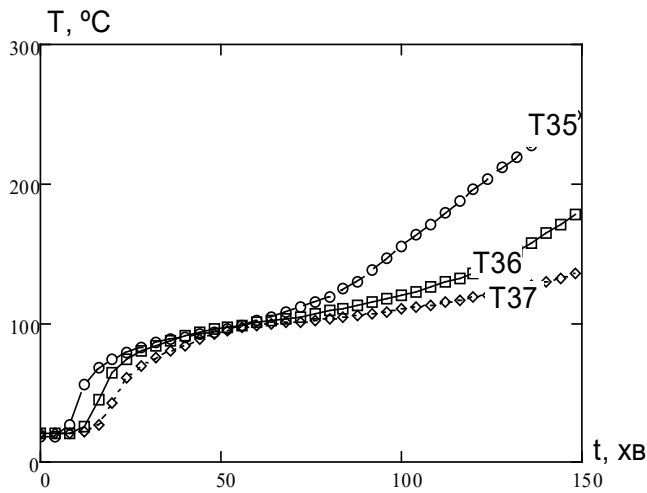
*a.*



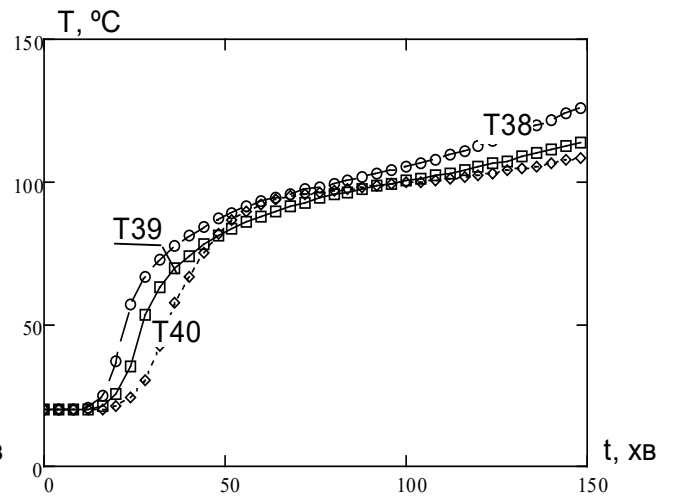
*б.*

Рис. 4.21. Показники термопар у крайових контрольних точках на необігрівній поверхні стінових фрагментів-зразків №1 (*a*) та №2 (*б*) з блоків із легкого бетону.

На рис. 4.22 подані залежності температур у контрольних точках у внутрішніх шарах стінових фрагментів-зразків з блоків із легкого бетону від часу випробувань згідно зі схемою розташування термопар на рис. 3.12.



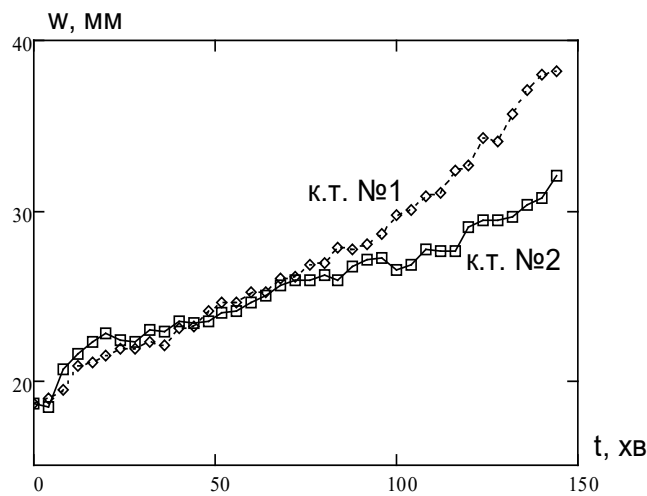
*a.*



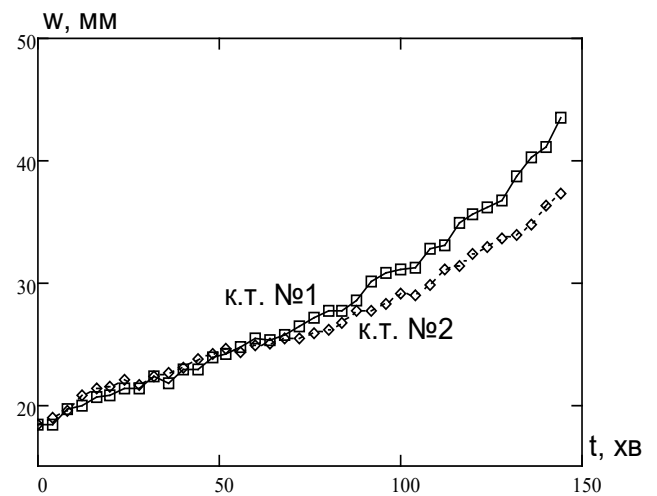
*б.*

Рис. 4.22. Показники термопар у внутрішніх контрольних точках стінових фрагментів-зразків №1 (*a*) та №2 (*б*) з блоків із легкого бетону.

На рис. 4.23 подані результати вимірювання вертикальних деформацій стінових фрагментів-зразків у двох контрольних точках по одній з кожного краю зразка.



*a.*



*б.*

Рис. 4.23. Вертикальні переміщення у контрольних точках (к.т.) стінових фрагментів-зразків №1 (*a*) та №2 (*б*) з блоків із легкого бетону.

На рис. 4.24 показані середні поперечні переміщення стінових фрагментів-зразків у їх серединному рівні

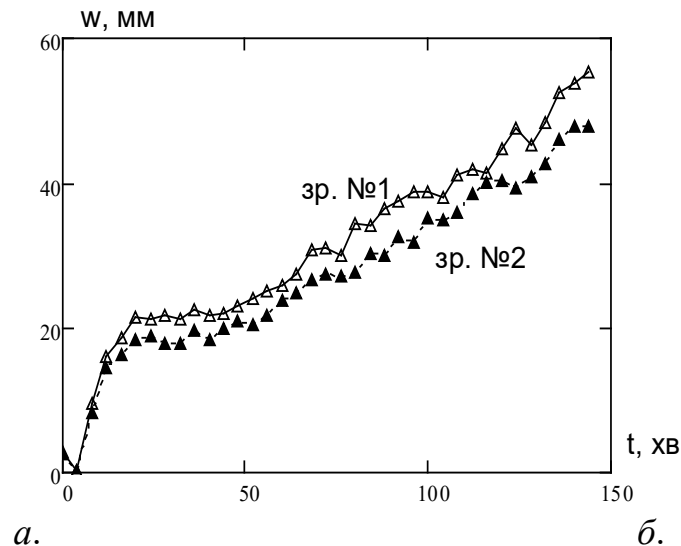


Рис. 4.24. Горизонтальні середні переміщення на серединному рівні стінових фрагментів-зразків з блоків із легкого бетону.

Результати досліджень поданих на рис. рис. 4.17 – 4.24 показали, що поведінка стінових фрагментів під час їх прогрівання при вогневій дії у випробувальній установці відповідає теоретичним уявленням про даний процес. В процесі випробувань стіновий фрагмент мав вигин у бік вогневої дії. Температурні криві нагрівання необігрівної поверхні мали характерну ділянку із сталим значенням температури близько 100 °С, пов'язану із випаровуванням вільної вологи у порах бетону.

Температури, які вимірювалися у печі та на обігрівній поверхні мали невеликий розкид, що підтверджують добру відтворюваність температурного режиму випробувань. Це означає що рух пічних газів та інтенсивне пароутворення несуттєво впливає на процес вимірювання.

Суттєвий розкид значень спостерігався при вимірюваннях температури на необігрівній поверхні, про що свідчить картина режимів прогрівання відповідних точок на рис. 4.25 та рис. 4.26. Помітний розкид мав місце при вимірюваннях температури у крайових точках необігрівної поверхні та у внутрішніх шарах фрагментів-зразків. Це пояснюється суттєвою залежністю результатів вимірювання від процесів деградації цементного каменю та його розтріскуванням.

Також, слід зазначити, що розкид значень вертикальних переміщень стінових фрагментів-зразків мав невелике значення.

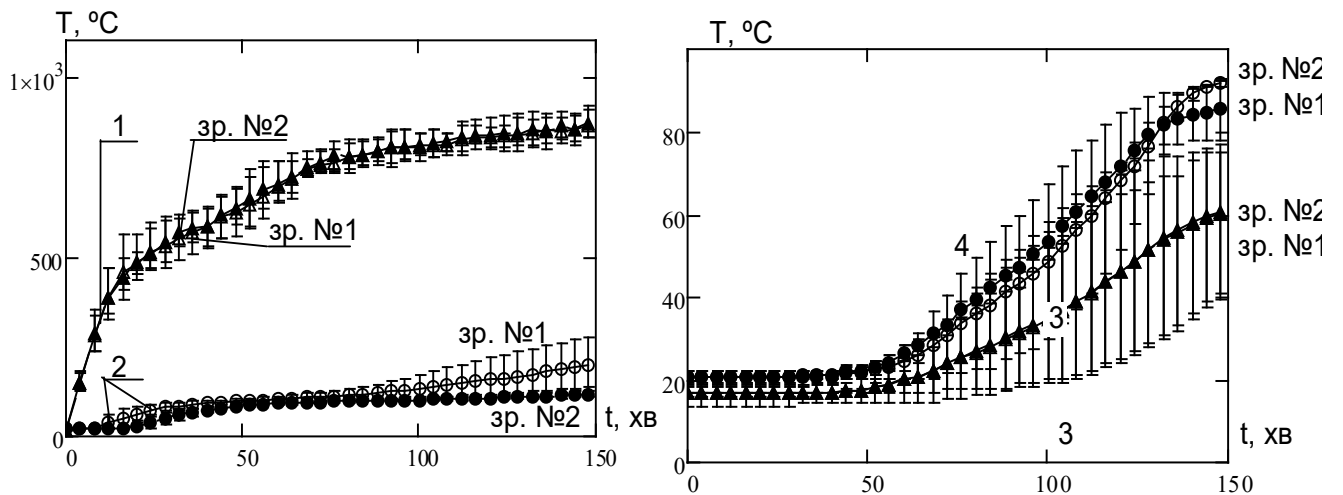


Рис. 4.25. Середня температура у контрольних шарах стінових фрагментів-зразків під час випробувань із відхиленнями:  
 1 – обігрівна поверхня; 2 – внутрішня контрольна точка; 3 – необігрівна поверхня; 4 – необігрівна поверхня (додаткові термомпари для визначення максимальної температури);

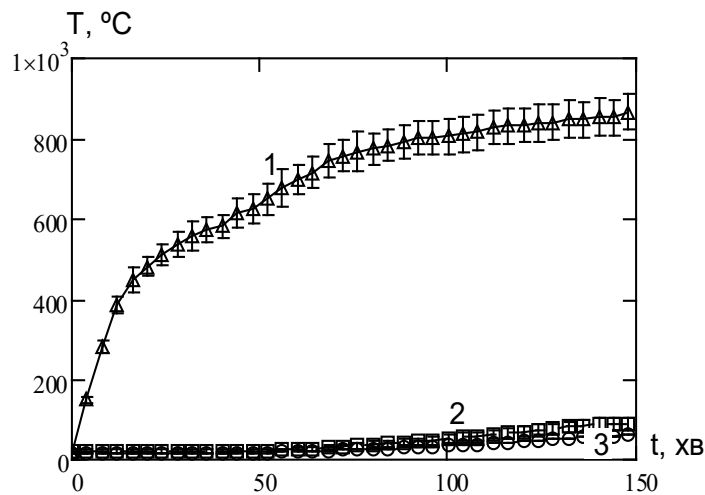


Рис. 4.26. Середня температура у контрольних шарах стінових фрагментів-зразків №1 та №2 під час випробувань із відхиленнями:  
 1 – обігрівна поверхня; 2 – внутрішня контрольна точка; 3 необігрівна поверхня.

На рис. 4.27 показані графіки вертикальних переміщень з відповідними відхиленнями, які були отримані для контрольних точок на торцях залізобетонних стінових фрагментів-зразків.

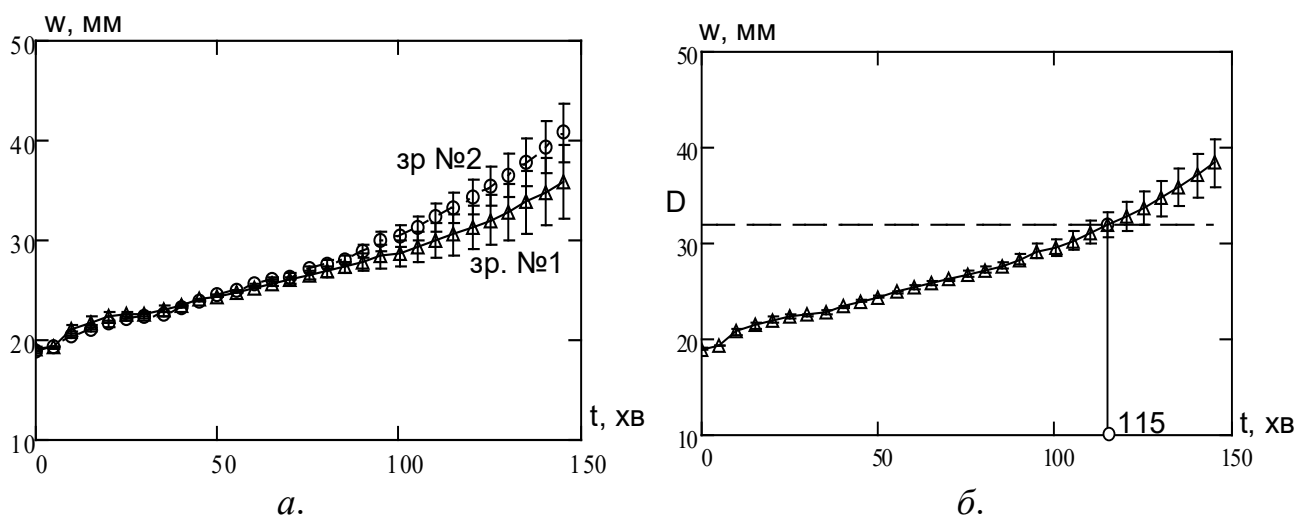


Рис. 4.27. Середні вертикальні переміщення з відхиленнями верхнього краю стінових фрагментів-зразків №1 та №2 (а) та середнє вертикальне переміщення з відхиленням для обох зразків (б).

В результаті випробувань виявлено що на 115 хв експонування відбувається настання граничного стану втрати несучої здатності, оскільки середні вертикальні деформації перевищують гранично допустимі (див. рис. 4.27)., тоді як швидкості наростання вертикальних деформацій критичних значень не перевищували. Настання інші граничних станів за втратою теплоізолювальної здатності та цілісності не спостерігалось.

Статистика вимірювань при випробуваннях кам'яних стінових фрагментів–зразків дозволяє визначити статистичні показники результатів проведеного випробування, включаючи дисперсію відтворюваності, що визначається за формулою (4.1).

У табл. 4.4 подані значення дисперсії температурних показників для контрольних шарів.

Дані табл. 4.4 вказують на помітну розбіжність експериментальних даних, проте вона є несуттєвою у межах допустимої похибки.

Таблиця 4.4

**Параметри відтворюваності вимірювань температури**

Параметр	Контрольний шар вимірювання температури			
	Обігрівна поверхня	Необігрівна поверхня (середня температура)	Необігрівна поверхня (максим. температура)	Внутр. контр. точк.
Зразок №1				
Максимальне відхилення від середнього значення, °С	112,7	23,7	19,5	51,8
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	7,1	14,9	18,2	12,7
Дисперсія відтворюваності, $S_{ad}^2$	3,8	2,3	5,6	10,154
Зразок №2				
Максимальне відхилення від середнього значення, °С	106,2	14,6	7,3	19,7
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	6,4	13,1	6,3	9,5
Дисперсія відтворюваності, $S_{ad}^2$	3,1	2,92	1,4	9,3

У табл. 4.5 подані значення дисперсії температурних показників для контрольних шарів.

Таблиця 4.5

**Параметри відтворюваності вимірювань вертикальних переміщень**

Зразок	Максимальне відхилення від середнього значення, мм	Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	Дисперсія відтворюваності
Зразок №1	3,7	3,9	0,142
Зразок №2	2,9	2,8	0,08

Дані табл. 4.4 та табл. 4.5 показують добру відтворюваність результатів вимірювання і те що їх можна вважати достовірними.

Проведені дослідження показали, що експеримент, щодо визначення температур у контрольних точках на обігрівній та необігрівній поверхнях стінових фрагментів проведений у відповідності до вимог стандартів щодо проведення випробувань несучих стін на вогнестійкість. Результати, що отримані при проведенні випробувань є достовірними. Таким чином, отримані результати випробувань можна використовувати для проведення інтерполяції з використанням розроблених нами алгоритмів та формул.

### 4.3. Інтерполяція температур у перерізі стінових фрагментів за результатами випробувань

За результатами випробувань, наведеними в попередньому пункті за алгоритмами, що були описані у 2 розділі даної роботи, була проведена інтерполяція температур з метою відновлення температурного поля у перерізі стінових фрагментів, які були піддані вогневим випробуванням. На рис. 4.28 подані розподілення температур, отримані за допомогою інтерполяції.

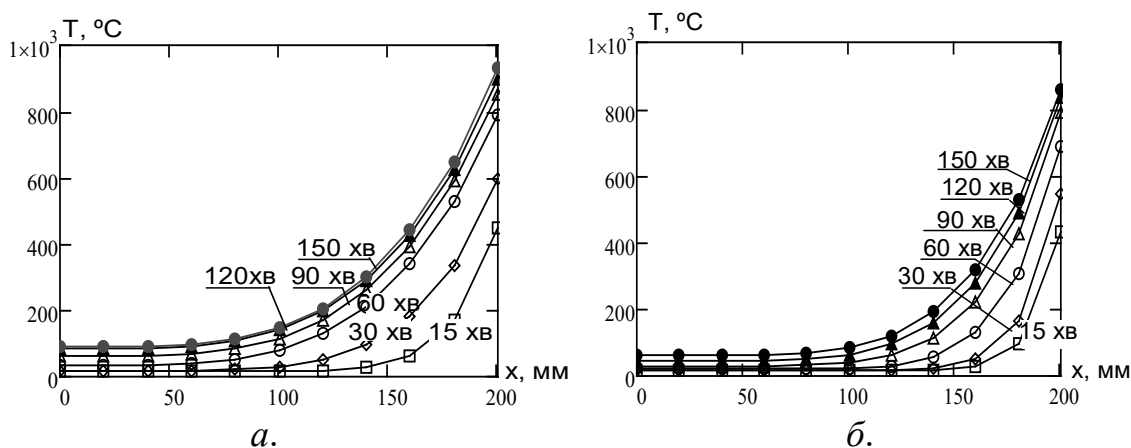


Рис. 4.28. Температурні розподілення у перерізі стінового фрагменту з залізобетону (а), та стінового фрагменту з блоків із легкого бетону (б) у різні моменти часу, отримані шляхом інтерполяції.

Аналіз графіків на рис. 4.28 показав, що відхилення інтерполяційних даних від даних експериментів лежать в межах розкиду температур, який був виявлений в ході аналізу експериментальних даних (див. рис. 4.20).

На рис. 4.29 подані дані, отримані експериментально і за допомогою інтерполяції для проведення аналізу адекватності.

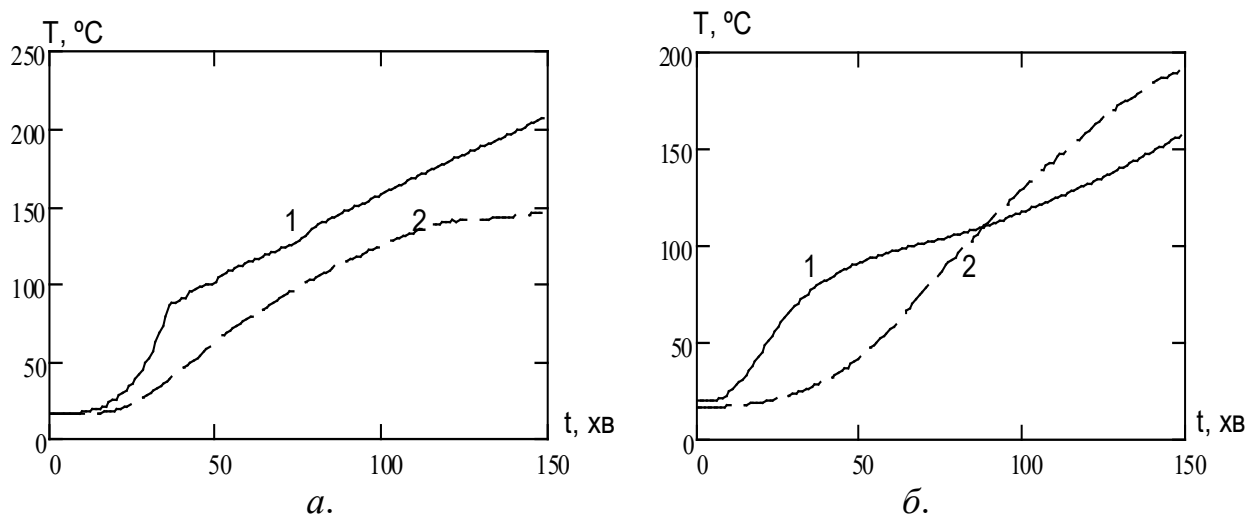




Рис. 4.29. Температурні режими прогріву внутрішніх шарів стінового фрагменту з залізобетону (а), та стінового фрагменту з блоків із легкого бетону (б): 1 – крива усереднених експериментальних даних; 2 – крива даних, отриманих у результаті інтерполяції.

Для більш детального аналізу адекватності результатів в кожній контрольній точці стін-зразків був проведений розрахунок F-критерію за формулою [105]:

$$F_c = \frac{S_{ad}^2}{S_{cp}^2} \leq F(v_1, v_2, \alpha), \quad (4.2)$$

де  $S_{ad}^2$  - дисперсія адекватності,

$S_{cp}^2$  - дисперсія відтворюваності експериментальних даних, що визначається за формулою (4.1),

$v_1 = n - 1$  – число ступенів вільності чисельника,

$v_2 = d(n - 1)$  – число ступенів вільності знаменника.

$\alpha = 0.05$  – рівень значущості.

Тут  $n$  – кількість вимірювання в одному експерименті,

$d$  – кількість експериментів.

Дисперсія адекватності визначається за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{d}{n-1} \sum_{k=1}^n \left[ \frac{\bar{y}_k^e - y_k}{\min(|\bar{y}_k^e|, |y_k|)} \right]^2, \quad (4.3)$$

де  $\bar{y}_k^e$  - середнє значення вимірної величини за вибіркою,

$y_k$  – поточне розрахункове значення.

Як окрема експериментальна ситуація розглянуто випробування одного із зразків-близнюків стінових фрагментів. Результати розрахунку наведені у табл. 4.6.

Висновок про адекватність робився на основі розрахункового значення з табличним при рівні значущості 0,05.

Дані табл. 4.6 показують, що результати, отримані за розглянутим способом інтерполяції є адекватними, оскільки значення критерію Фішера в обох випадках не перевищує табличного значення.

Таким чином, дослідження адекватності результатів інтерполяції, що проведена за запропонованими нами алгоритмами та формулами, показали, що статистичні критерії, вибрані нами, задовольняються. Це показує адекватність отриманих результатів інтерполяції.

**Статистичні параметри, отримані при дослідженні адекватності результатів  
апроксимації температурних розподілів у зразках**

Число ступенів вільності чисельника, $\nu_1$	Число ступенів вільності знаменника, $\nu_2$	Кількість експериментів, $d$	Кількість вимірювань в експерименті, $n$	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{ф}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. [105].	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
Залізобетонні стінові фрагменти									
149	298	2	150	12,9	5,1	0,488	1,01	12,6	5,9
Стінові фрагменти з блоків із легкого бетону									
149	298	2	150	13,3	7,7	0,579	1,01	12,9	6,2

Отримані результати можна використовувати для проведення аналізу міцності стінових фрагментів, підданих випробуванням на вогнестійкість, у якості початкових даних.

## РОЗДІЛ 5

### ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТА КАМ'ЯНИХ НЕСУЧИХ СТІН

#### 5.1. Обґрунтування методу інтерпретації даних стандартних вогневих випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін

При неможливості забезпечити проведення випробувань на вогнестійкість несучих стін з прикладанням механічного навантаження, відповідного до розрахункової схеми будівлі, інтерпретація отриманих даних у ході випробувань може відбуватися за методом, схема процедур якого подана на рис. 5.1

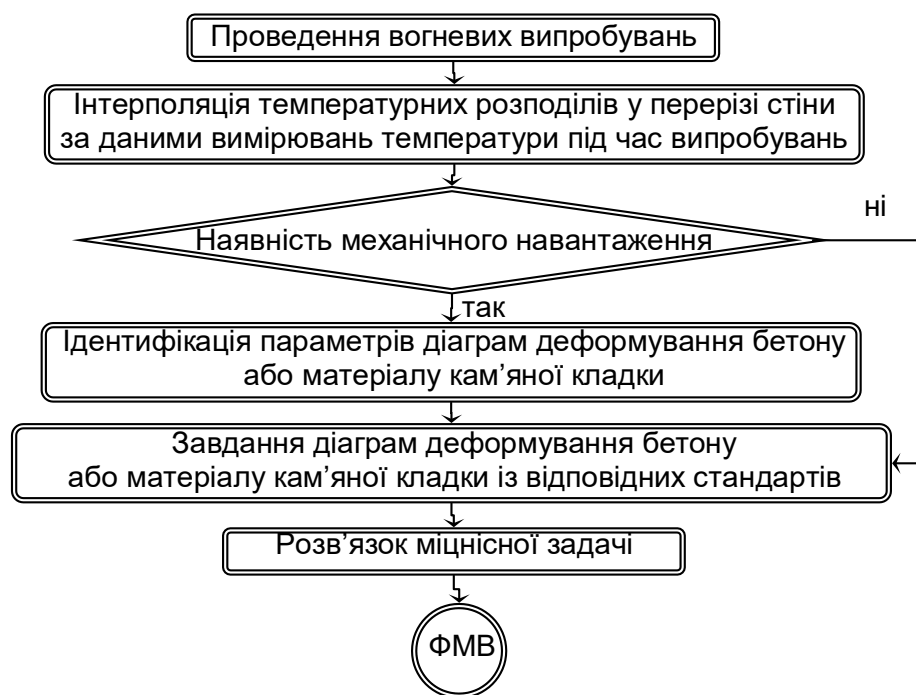


Рис. 5.1. Схема здійснення оцінки вогнестійкості за допомогою інтерпретації результатів вогневих випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін.

Згідно із схемою на рис. 5.1 випробування можуть проводитися у двох варіантах: із прикладанням механічного навантаження, меншого за діюче, та взагалі без його прикладання. В останньому випадку можна використати методику розрахунку, описану в роботах [118, 119]. Ця методика полягає у визначенні межі вогнестійкості за допомогою вирішення міцнісної задачі шляхом обчислення несучої здатності у кожний момент часу випробування за максимальним зусиллям, при якому можливе досягнення критичного значення вертикальних переміщень. Розрахунок полягає у визначенні результуючої деформації та кривизни вісі стіни при розв'язку системи рівнянь (1.8) за поточним станом перерізу стіни з огляду на її міцнісні та деформативні властивості у результаті нагріву внутрішніх шарів. При

цьому використовуються діаграми деформування для бетону і арматурної сталі згідно з рекомендаціями частини другої Eurocode 2 [40], та частини другої Eurocode 6 [60]. Настання граничного стану фіксується у випадку, коли несуча здатність стіни є меншою за діюче навантаження.

У іншому випадку, який є найбільш властивим для випробувальних лабораторій України, коли випробування на вогнестійкість несучих стін відбувається із навантаженням, значно меншим за діюче, можна застосувати подібний підхід після того як на основі отриманих даних щодо деформацій зразку у ході випробування будуть уточнені термомеханічні властивості компонентів залізобетону або матеріалу кам'яної кладки. У випадку залізобетону можна механічні властивості уточнювати тільки для бетону, оскільки властивості сталі більш жорстко відтворюються при її виготовленні.

Як показали дослідження, наведені у роботах [90 – 92], найбільший вплив на результати, які отримуються у ході розрахункової оцінки меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій, має коефіцієнт роботи бетону, що описує зниження міцності бетону у залежності від температури.

Таким чином, після встановлення залежності коефіцієнту роботи бетону від температури, можна збільшити точність результатів міцнісного розрахунку щодо оцінки вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності для кам'яних та залізобетонних стін при інтерпретації результатів випробування їх на вогнестійкість.

## 5.2. Обґрунтування методу ідентифікації коефіцієнту роботи матеріалу стіни за результатами її вогневих випробувань

При математичному описанні діаграм деформування бетону або матеріалу кладки з огляду на діючі в Україні стандарти [40, 60] можна використати такий вираз:

$$\sigma(\varepsilon) = k_{c,T} F(\varepsilon, T), \quad (5.1)$$

де  $F(\varepsilon)$  – певна функція, залежна тільки від деформації при даній температурі нагріву визначеного шару для бетону та багатьох матеріалів кладки визначається за формулами:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{c1,T}, \quad F(\varepsilon, T) &= \frac{3\varepsilon \cdot f_c}{\varepsilon_{c1,T} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,T}} \right)^3 \right)}, \\ \text{при } \varepsilon_{c1,T} < \varepsilon < \varepsilon_{cu1,T}, \quad F(\varepsilon, T) &= f_c - \frac{f_c \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{cu1,T} - \varepsilon_{c1,T}}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

де  $\varepsilon_{c1,T}$  – залежне від температури значення відносної деформації, до якої діаграма деформування матеріалу має зростаючу гілку;

$\varepsilon_{cu,T}$  – залежне від температури максимальне значення відносної деформації, до настання якого матеріал у змозі чинити опір;

$f_c$  – межа міцності матеріалу на стискання, Па.

Згідно з діючими стандартами України [40, 60] коефіцієнт роботи бетону має залежність від температури, що подається у табличному вигляді з 13 значень. Проміжкові значення визначаються за допомогою лінійної інтерполяції.

Схема визначення коефіцієнту роботи матеріалів стін подана на рис. 5.2. Згідно з цією схемою необхідно записати систему (1.8) у формі, що є зручною для визначення уточнених табличних значень коефіцієнту роботи. Вигляд виразів (5.1) та (5.2) дозволяє записати систему (1.8) у вигляді системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР).

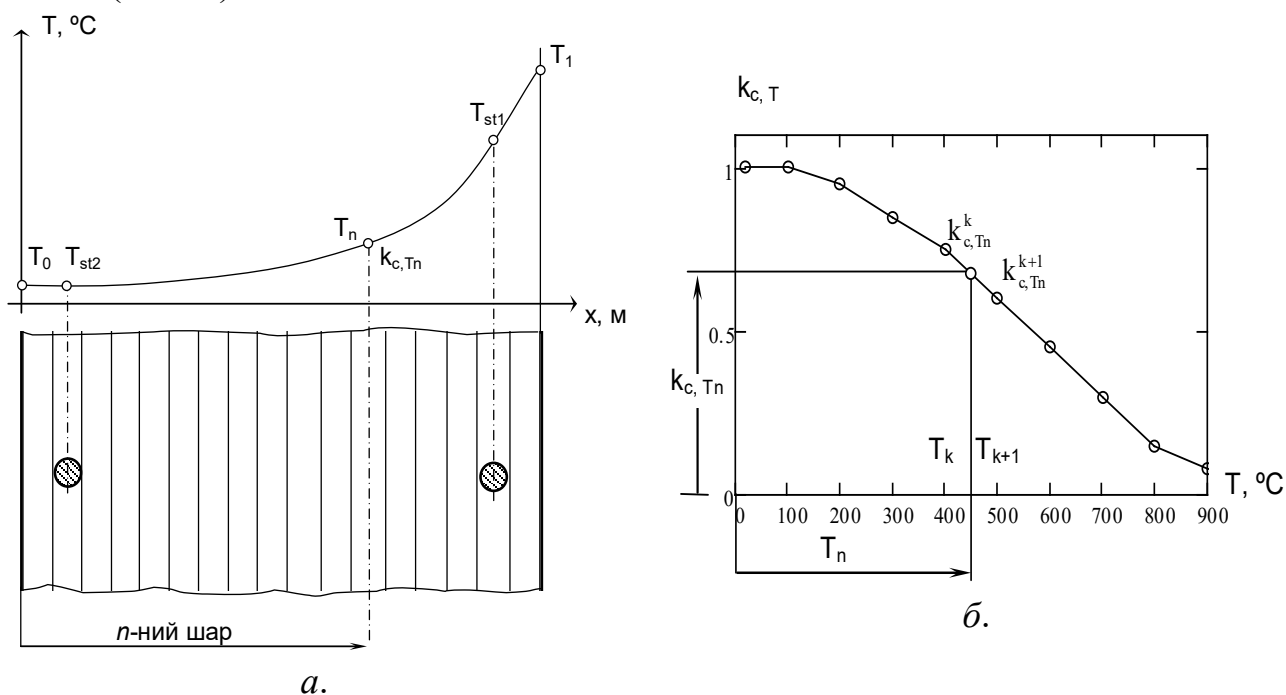


Рис. 5.2. Визначення коефіцієнту роботи матеріалу стіни за температурою у внутрішньому шарі: а – схема розбиття на шари перерізу стіни; б – схема інтерполяції за табличними даними

В якості невідомих записуються табличні значення коефіцієнтів роботи бетону. Описана СЛАР має такий кінцевий вигляд:

$$[\mathbf{F}]\{\mathbf{k}\} + \{\mathbf{S}\} = 0, \quad (5.2)$$

де  $\{\mathbf{k}\} = (k_{c1} \ k_{c2} \ \dots \ k_{cm})^T$  – вектор табличних значень коефіцієнту роботи матеріалу стіни відповідні табличним температурам  $\{\mathbf{T}_m\} = (0 \ 100 \ 200 \ \dots \ T_m)^T$ , що виступають у якості невідомих;

$[\mathbf{F}]$  – матриця, яка записується у вигляді:

$$[\mathbf{F}] = \begin{pmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & & Z_{ij} & & Z_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mj} & \dots & Z_{mm} \end{pmatrix}, \quad (5.3)$$

де члени матриці визначаються за формулами:

$$Z_{i1} = \sum_n [1 - 0.01(T_{ni} - T_1)] F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right), \quad Z_{im} = \sum_n 0.01(T_{ni} - T_{m-1}) F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right) \quad (5.3)$$

$$Z_{ij} = \sum_n [1 - 0.01(T_{ni} - T_j)] F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right) + \sum_n 0.01(T_{ni} - T_{j-1}) F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right).$$

Величина  $m = \lceil T_{\max} \cdot 0.01 \rceil$  є кількістю рівнянь та перемінних у системі (5.2), що визначається максимальною температурою нагрівання стіни під час випробувань. При складанні рівнянь конкретні моменти часу визначаються рівномірно між першим і останнім моментом часу випробувань.

Тут  $w_x$  – поперечний прогин стіни під час випробувань.

{**S**} – вектор зусиль у арматурних стержнях, який визначається за виразом:

$$\{\mathbf{S}\} = (S_1 \dots S_i \dots S_m)^T, \quad (5.4)$$

де  $S_i = F_{st1}(\varepsilon, T_{st1}) + F_{st2}(\varepsilon, T_{st2})$ . Зусилля у арматурі в  $i$ -тий момент часу визначаються за виразами наведеними у стандартах щодо розрахунку залізобетонних конструкцій [40]:

при $0 < \varepsilon < \varepsilon_{s0}$	$F_{st}(\varepsilon, T) = E_{s,T} \varepsilon$	
при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{sy}$	$F_{st}(\varepsilon, T) = f_{sp,T} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}$ ,	(5.5)
при $\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st}$	$\sigma_s = f_{sy,T}$ ,	
при $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{s2}$	$F_{st}(\varepsilon, T) = f_{sy,T} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})]$ ,	
при $\varepsilon_{s2} < \varepsilon$	$\sigma_s = 0$	

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

$$a^2 = (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp} + c/E_{s,T}), \quad b^2 = c(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} + c^2$$

$$c = \frac{(f_{sy,T} - f_{sp,T})^2}{(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} - 2(f_{sy,T} - f_{sp,T})} \quad (5.6)$$

у формули (5.5), (5.6) входять такі величини:

$\varepsilon_{sy}$  – деформація, при якій настає межа текучості,

$\varepsilon_{st}$  – деформація, при якій починається спадна гілка діаграми,

$f_{sp,T}$  – межа пропорційності сталі,

$f_{sy,T}$  – межа міцності сталі,

$E_{s,T}$  – модуль пружності сталі, залежний від температури нагріву

Деформація при обчисленні компонентів системи рівнянь (5.2) визначається за виразами [41, 60]:

$$\varepsilon_{n,i} = \xi_i + \chi_i x_n - \varepsilon_{Tn}, \quad (5.7)$$

де  $\xi_i, \chi_i$  – поздовжнє видовження та кривизна вісі стіни у  $i$ -тий момент часу;

$\varepsilon_{Tn}$  – температурна деформація, що визначається за таблицями у стандартах [40, 60];

$x_n$  – координата  $n$ -го внутрішнього шару перерізу стіни, що вимірюється від серединної точки перерізу.

Поздовжнє видовження та кривизна вісі стіни пов'язані з її переміщеннями, які вимірюються під час випробувань за виразами.

$$\xi = 1 - h^{-1} \int_0^{h+w_y} \sqrt{1 + \left( \frac{w_x \pi}{h + w_y} \right)^2} \cos^2 \left( \frac{w_x \pi \cdot x}{h + w_y} \right) dx \quad (5.8)$$

$$\chi = \pi^2 w_x (h + w_y)^{-2}.$$

де  $w_y$  – поздовжнє переміщення верхнього краю стіни під час випробувань

Таким чином, маючи вимірювання температури та переміщень, отримані під час випробувань можна провести уточнення коефіцієнту роботи матеріалу стіни і на основі цих даних провести оцінку вогнестійкості несучих та кам'яних стін. Для цього застосуємо математичний апарат (5.2) – (5.8) та вимірювання отримані у попередньому розділі дійсної роботи. На рис. 5.3 подані залежності коефіцієнту роботи бетону та кладки із блоків з легкого бетону, що отримані для випробуваних стінових фрагментів.

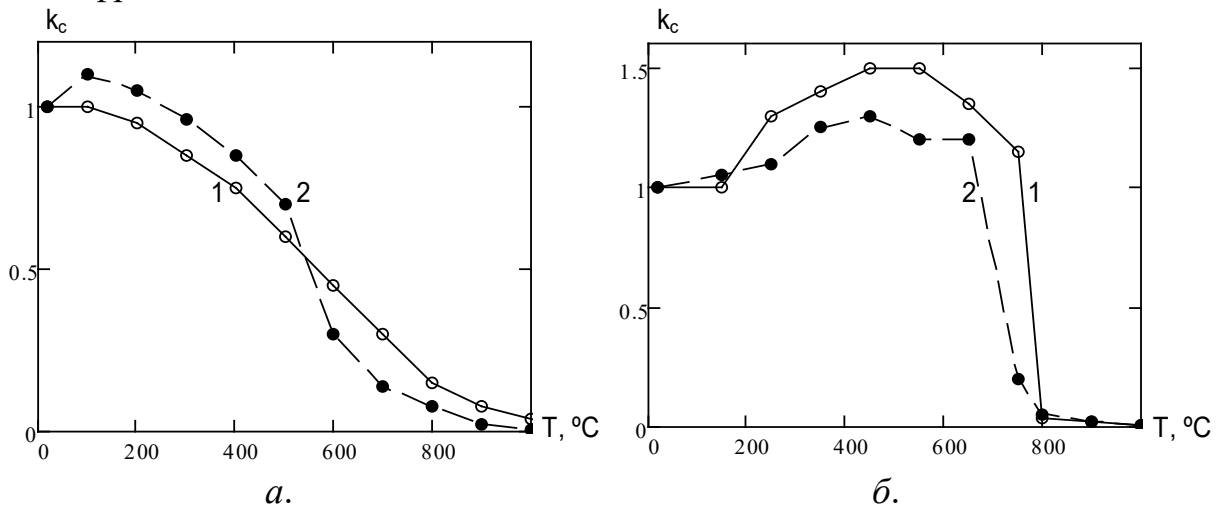


Рис. 5.3. Залежності коефіцієнту роботи бетону (а) та кладки із блоків з легкого бетону (б): 1 – стандартна залежність, 2 – уточнена залежність.

Аналіз графіків на рис. 5.3 показує, що вони суттєво відрізняються від графіків, що подані у відповідних стандартах [40, 60], що діють в Україні. Це певним чином підтверджує ефективність розробленої методики.

### 5.3. Обґрунтування методу вирішення міцнісної задачі для оцінки вогнестійкості залізобетонних та кам'яних несучих стін

При визначених температурних розподілах шляхом інтерполяції та уточнених пружно-пластичних властивостей матеріалу стін можна вирішувати міцнісну задачу. Для розв'язку міцнісної задачі потрібно вибрати відповідний розрахунковий метод. Для розрахунку використаний підхід, якій пропонується у

нормах [40]. Даний підхід полягає у поступовому збільшенні кривизни стіни у бік обігрівної сторони у кожний контрольний момент часу випробування із одночасним визначенням поздовжньої сили на кожному кроці збільшення деформації. При досягненні критичного значення переміщення, що визначається за формулою (1.2) розрахунок припиняється. Із отриманих значень сили вибирається найбільше, яке і буде вважатися несучою здатністю випробуваної стіни. Розрахунок відбувається з використанням системи рівнянь (1.8). Розрахункова схема стіни, що використовується при проведенні обчислень наведена на рис. 3.14.

Для математичного описання механічних властивостей основного матеріалу стіни використані формули (5.2). Діаграми деформування для основного матеріалу побудовані з огляду на уточнені залежності коефіцієнту роботи, які наведені на рис. 5.2. Вигляд діаграм для основних матеріалів випробуваних стін поданий на рис. 5.4.

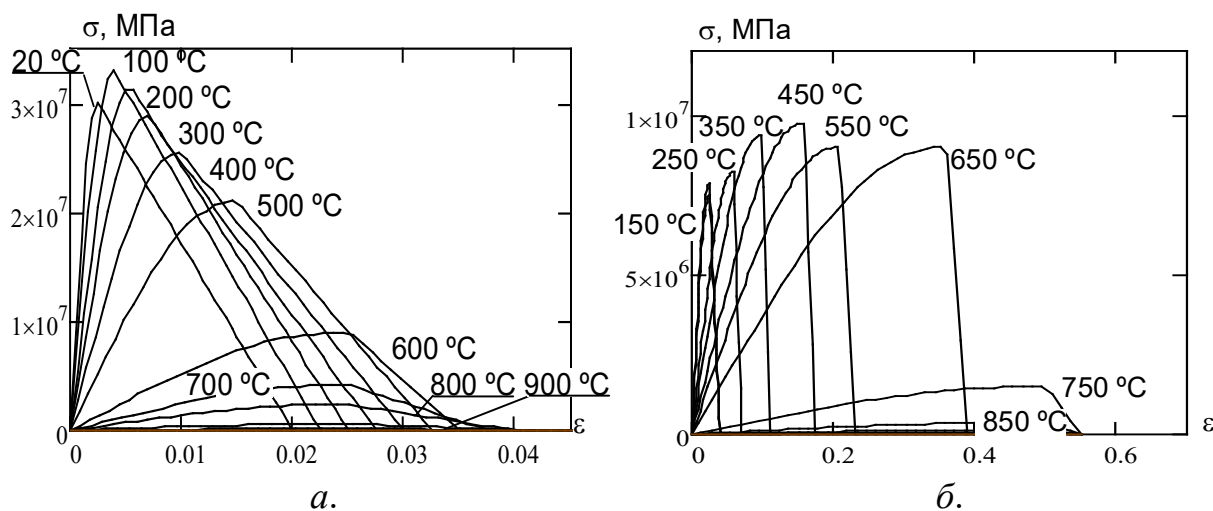


Рис. 5.4. Діаграми деформування бетону (а) та кам'яної кладки з легкого бетону (б) стінових фрагментів-зразків.

Для описання механічних властивостей арматурної сталі були застосовані стандартні діаграми, які описуються формулами (5.5) – (5.6). На рис. 5.5 подані діаграми деформування для арматурної сталі А500С.

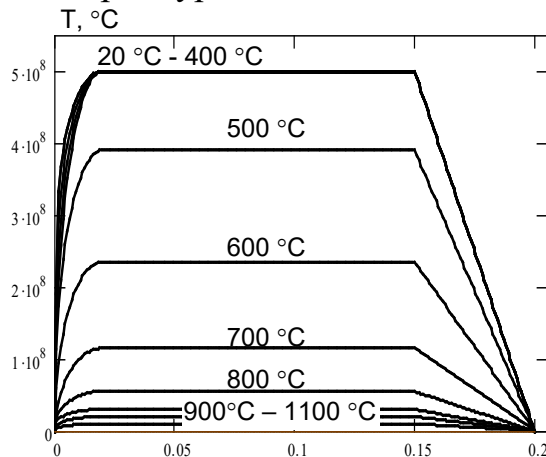


Рис. 5.5. Діаграми деформування арматурної сталі колон-зразків.



На рис. 5.6 представлена блок-схема для побудовання графіку поздовжньої сили у залежності від кривизни нейтральної лінії стіни.

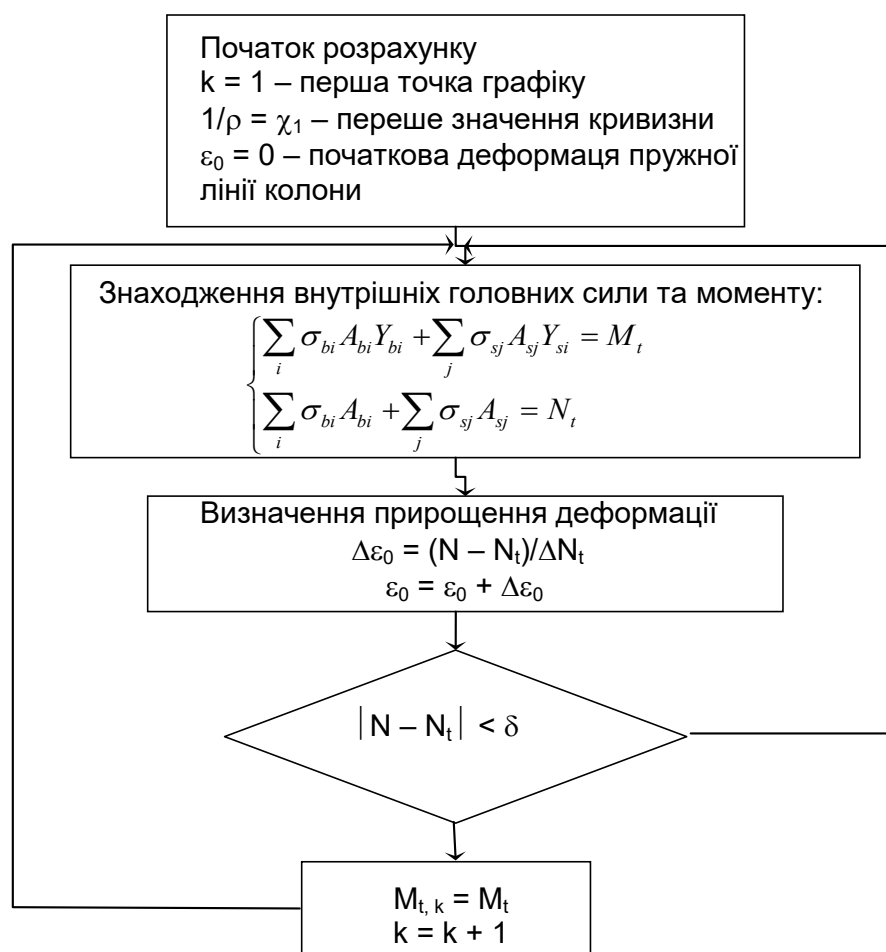


Рис. 5.6. Блок-схема побудовання графіку головного моменту у переріз колони.

На рис. 5.7 показані результати розрахунку у вигляді графіків несучої здатності.

Графіки на рис. 5.7 показують, що уточнені характеристики сильно впливають на кінцевий результат, оскільки максимальне відхилення для залізобетонної стіни складає 76 кН (майже 8 т), а середнє відносне відхилення складає 18 %. Так само для кам'яної стіни з легкого бетону максимальне відхилення для залізобетонної стіни складає 41 кН (майже 4 т), а середнє відносне відхилення складає 17 %.

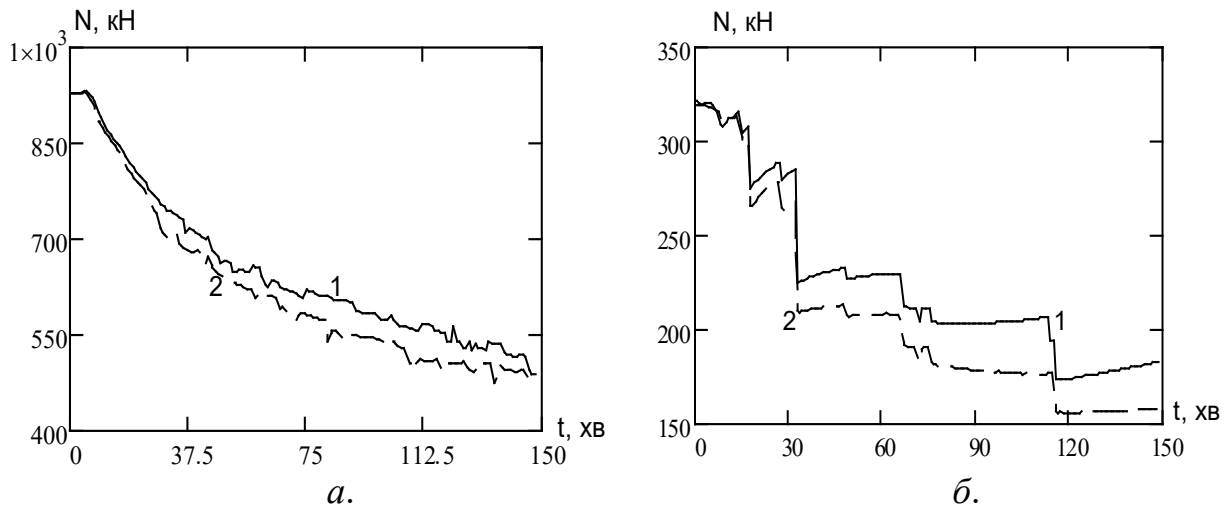


Рис. 5.7. Температурні залежності несучої здатності залізобетонної (а) та кам'яної стіни з легкого бетону (б): 1 – отримана на основі стандартних діаграм деформування матеріалу стіни; 2 – отримана на основі уточнених діаграм деформування матеріалу стіни.

Для порівняння результатів оцінки межі вогнестійкості за несучою здатністю з використанням стандартних та уточнених діаграм деформування матеріалу стіни були розглянуті випадки, коли діюче навантаження на стіну відповідає значенню приведеної зосередженої сили складає 500 кН для залізобетонної стіни і 200 кН.

У результаті розрахунку для залізобетонної стіни відхилення межі вогнестійкості складало 27 хв (22 %), а для кам'яної стіни з легкого бетону складало 33 хв (42 %). Це означає, що уточнення діаграм деформування матеріалу стіни має приводити до суттєвого уточнення оцінки межі вогнестійкості

Отримані результати проведеного розрахунку також показали, що розроблений алгоритм є стійким і може ефективно застосовуватися для удосконаленого методу випробувань несучих залізобетонних та кам'яних стін на вогнестійкість.

Проведені дослідження дають змогу розробити повний алгоритм удосконаленого методу оцінки вогнестійкості несучих залізобетонних та кам'яних стін за допомогою стандартних вогневих випробувань.

#### 5.4. Алгоритм удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість несучих залізобетонних та кам'яних стін

З огляду на проведенні дослідження був розроблений алгоритм удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість несучих залізобетонних та кам'яних стін, блок-схема якого приведена на рис. 5.8.

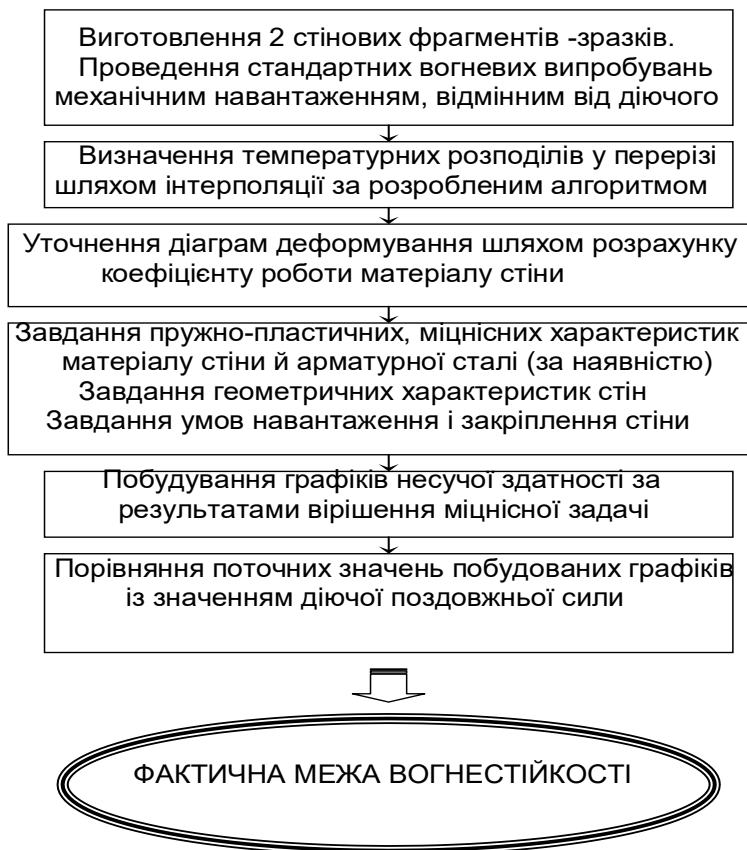


Рис. 5.8. Алгоритм визначення межі вогнестійкості за удосконаленим методом випробувань несучих залізобетонних та кам'яних стін

Розроблений алгоритм був реалізований у вигляді програмного забезпечення на основі програмної системи Microsoft Office Excel.

На рис. 5.9 подана сторінка вводу початкових даних для реалізації методу.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Показання термомпар	Наблужена поверхнсть	Внутренний слой	Вертикальное горизонтальное перемещение	Горизонтальное перемещение	Свойства бетона	Свойства арматуры со стороны обогреваемой поверхности	Свойства арматуры со стороны необогреваемой поверхности	Свойства арматуры со стороны обогреваемой поверхности	Геометрические размеры	Сечение	Высота	Расчетная схема	Шаг	Давление	
T <sub>2</sub> , °C	T <sub>1</sub> , °C	T <sub>1</sub> , °C	W, м	H, мм	Класс прочности	Тип	Класс прочности	Диаметр d, м	Диаметр d, м	Толщина м	Толщина защитного слоя w, м	арматуры на стену, q, т/м2	3.2	0.2	150
17.67	15.737	20	0.019	3.07E-03	LC 8/10	1	A600C	0.016	A240C	0.016	0.02	0.02	3.2	0.2	150
34.441	15.737	20	0.019	1.22E-03											
75.07	15.737	20.001	0.019	1.27E-03											
119.604	15.737	20.009	0.019	9.80E-04											
148.783	15.737	20.045	0.019	1.90E-04											
172.935	15.935	20.151	0.019	2.12E-03											
201.901	15.935	20.397	0.02	4.71E-03											
238.066	16.155	20.862	0.02	7.52E-03											
283.271	16.155	21.68	0.021	0.01											
326.868	16.594	22.954	0.021	0.013											
365.637	16.594	24.784	0.022	0.015											
399.922	16.594	26.729	0.022	0.016											
387.678	16.594	28.138	0.022	0.017											
407.877	16.594	29.568	0.022	0.018											
415.932	16.594	31.182	0.022	0.019											
428.771	16.594	33.1	0.022	0.019											
445.347	16.594	35.381	0.022	0.02											
459.614	16.814	38.037	0.023	0.021											
470.633	16.814	40.424	0.023	0.021											
482.808	16.814	42.86	0.023	0.021											
482.448	16.814	45.477	0.023	0.022											
489.486	16.814	48.39	0.023	0.022											
492.375	16.814	51.335	0.023	0.023											
502.052	17.232	54.061	0.023	0.023											
509.024	17.232	56.369	0.023	0.023											
514.537	17.232	58.565	0.023	0.022											
523.917	17.232	60.729	0.023	0.022											
524.352	17.462	62.934	0.023	0.022											
531.873	17.671	65.075	0.023	0.022											
537.469	17.671	66.936	0.023	0.022											
547.302	17.891	68.672	0.023	0.022											
556.311	17.891	70.361	0.023	0.022											
550.947	17.891	72.03	0.023	0.022											
558.059	17.891	73.706	0.023	0.022											
562.773	18.121	75.416	0.023	0.022											
562.043	18.528	76.885	0.023	0.023											
565.641	18.528	78.169	0.023	0.023											
576.003	18.968	79.355	0.024	0.023											
581.914	18.968	80.475	0.023	0.023											
588.24	19.407	81.562	0.024	0.023											
586.377	19.627	82.633	0.024	0.023											
596.476	19.825	83.677	0.024	0.023											
601.085	20.484	84.689	0.024	0.023											
604.967	20.704	85.666	0.024	0.023											
606.234	21.132	86.607	0.024	0.023											
613.19	21.781	87.51	0.024	0.024											
617.446	22.011	88.375	0.024	0.024											
619.169	22.638	89.203	0.024	0.024											
628.707	22.868	89.995	0.024	0.024											

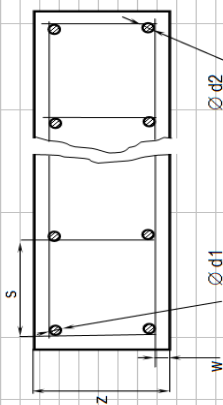


Рис. 5.9. Сторінка вводу початкових даних розробленого програмного забезпечення

На рис. 5.10 показана сторінка виводу даних розробленого програмного щодо оцінки вогнестійкості.

$\Phi_{\text{ПО}} := \Phi_{p_0}$      $\text{RSC} := \Phi_{p_1}$      $N_f := \Phi_{p_2}$

Межа вогнестійкості стіни

$\Phi_{\text{ПО}} = \text{"Межа вогнестійкості не досягнута"}$

Ресурс несучої здатності стіни

$\text{RSC} = 49.495\%$

Графік зниження несучої здатності стіни

$N, \tau$

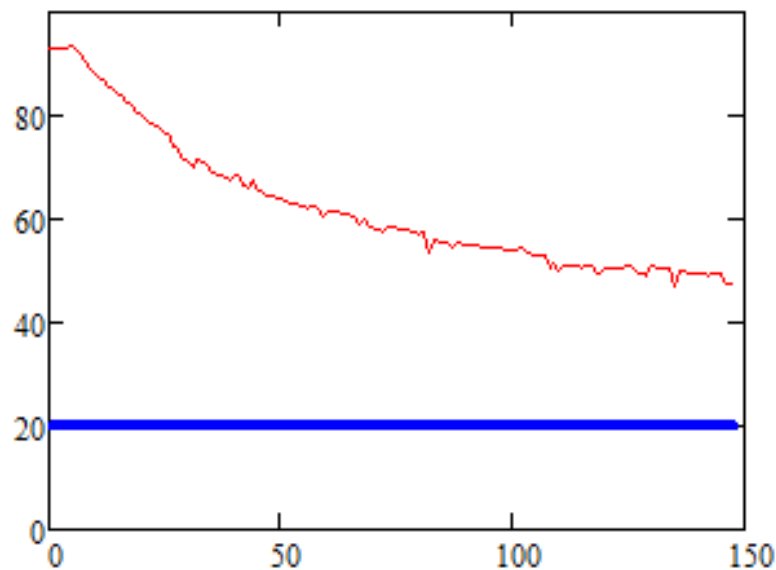


Рис. 5.10. Сторінка виводу результатів розробленого програмного забезпечення

### 5.5. Оцінка точності результатів оцінки вогнестійкості залізобетонних колон за удосконаленим методом

Для оцінки адекватності результатів, які отримуються за удосконаленим методом випробувань на вогнестійкість несучих залізобетонних та кам'яних стін за допомогою стандартних вогневих була використана методика, яка полягає у проведенні всіх процедур розробленого удосконаленого методу за наданням результатам вимірювань збурень відповідних до експериментальної похибки. Після обчислень визначалася відповідна дисперсія за формулою (2.4). У якості критерію, що визначає точність отриманих результатів використовується абсолютне відхилення, відносне відхилення та середньоквадратичне відхилення.

На рис. 5.11 та рис. 5.12 подані вихідні дані для проведення розрахунків разом із збуреннями.

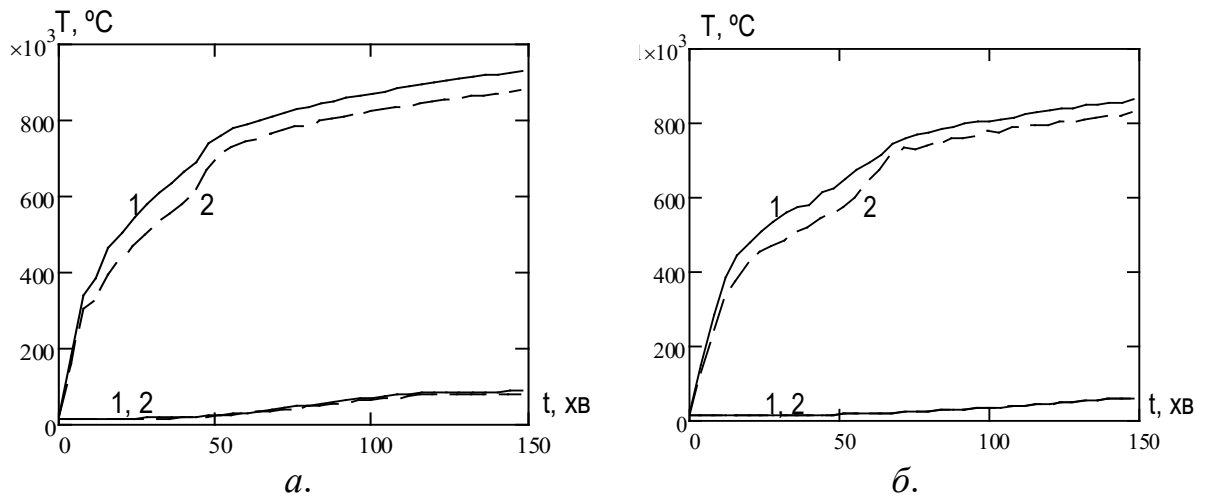


Рис. 5.11. Температурні режими нагріву обігрівної сторін залізобетонної (а) та кам'яної стіни з легкого бетону (б): 1 – середня температура, отримана експериментально, 2 – температура із збуренням.

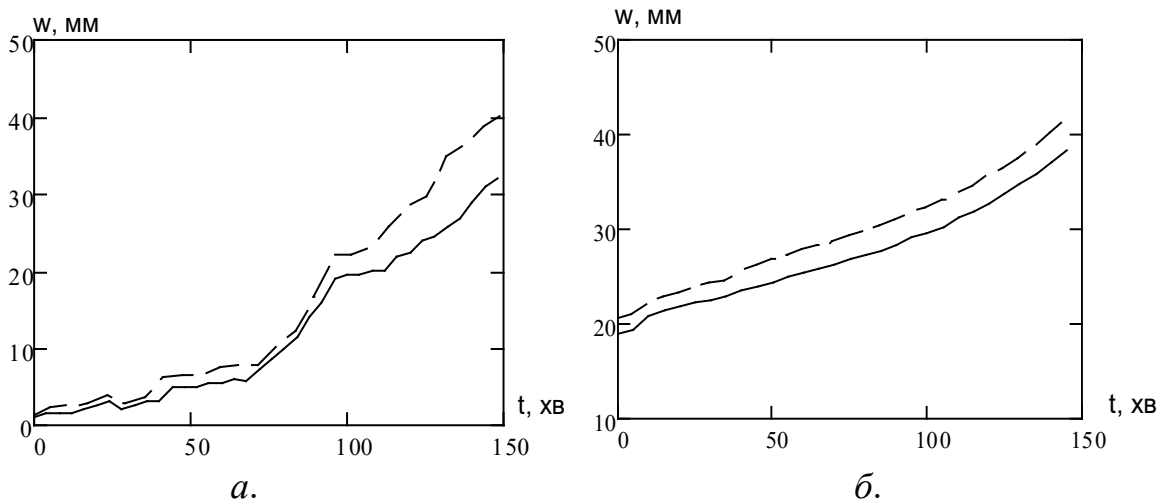


Рис. 5.12. Горизонтальне переміщення верхнього краю залізобетонної (а) та кам'яної стіни з легкого бетону (б): 1 – переміщення, отримане експериментально, 2 – переміщення із збуренням.

На рис. 5.13 показані результати розрахунку коефіцієнтів роботи матеріалів стін для випробуваних зразків, отриманих із застосуванням вихідних даних із збуренням.

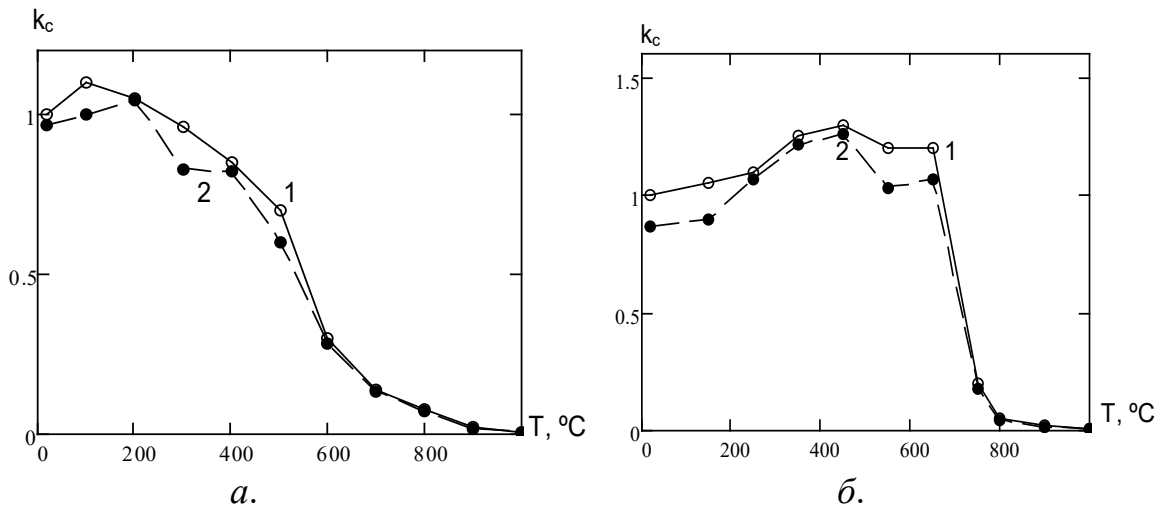


Рис. 5.13. Залежності коефіцієнту роботи бетону (а) та кладки із блоків з легкого бетону (б): 1 – стандартна залежність, 2 – уточнена залежність.

Використовуючи отримані дані у якості початкових, була визначена несуча здатність для випробуваних зразків. Результати розрахунку подані на рис. 5.14.

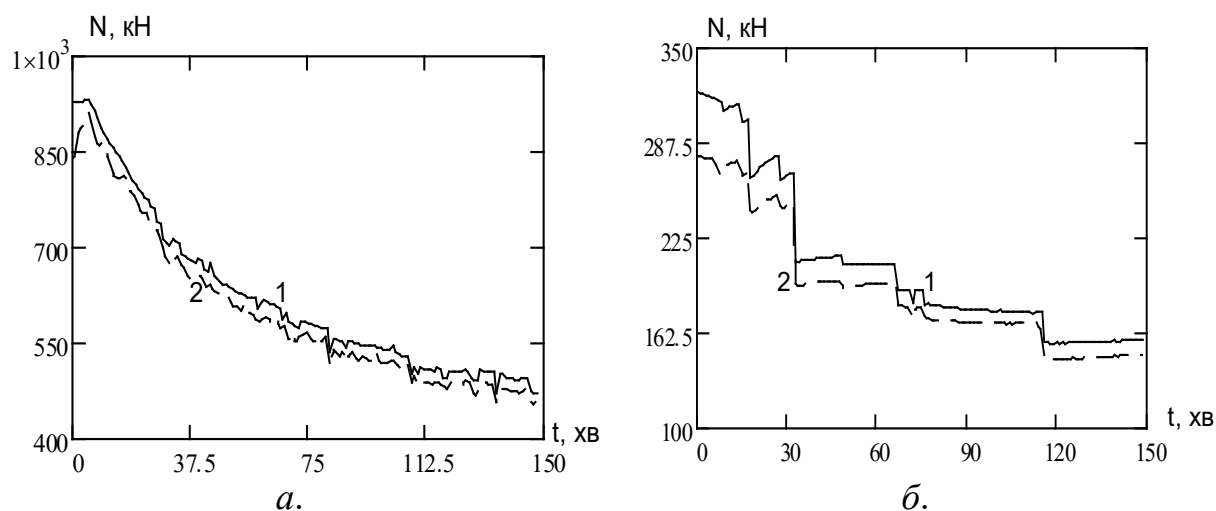


Рис. 5.14. Температурні залежності несучої здатності залізобетонної (а) та кам'яної стіни з легкого бетону (б): 1 – отримана на основі уточнених діаграм деформування матеріалу стіни; 2 – отримана на основі діаграм деформування матеріалу стіни із збуренням коефіцієнту роботи.

Оцінюючи вогнестійкість стін, що були піддані випробуванням, були розглянуті випадки діючого навантаження, що описані вище. На основі проведених розрахунків були отримані дані, що подані у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

**Точність визначення несучої здатності стінових фрагментів-зразків для випробування**

Зразок для випробування	Абсолютне відхилення, кН	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, кН
Залізобетонний стіновий фрагмент	17	3,4	0,51
Стіновий фрагмент з блоків із легкого бетону	4	3,6	0,33

**Точність визначення межі вогнестійкості стінових фрагментів-зразків  
для випробування**

Зразок для випробування	Межа вогнестійкості, отримана експериментально, хв	Розрахункова межа вогнестійкості, хв	Абсолютне відхилення, хв	Відносне відхилення, %
Залізобетонний стіновий фрагмент	119	112	7	5,9
Стіновий фрагмент з блоків із легкого бетону	116	114	2	1,7

Аналізуючи дані табл. 5.1 і табл. 5.2, можна прийти до висновку, що розроблений удосконалений метод дає точні результати, оскільки середня похибка при визначенні несучої здатності складає 3,5 %, середня похибка при визначенні межі вогнестійкості складає 3,9%. Даний метод є більш ефективним, оскільки за рахунок менш матеріаломісткого, енергоємного, простішого у проведенні підготовки до випробувань і самих випробувань, він має низьку вартість та трудомісткість і у той же час більшу точність проведення експериментів.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Милованов А.Ф. Расчет жаростойких железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1975. – 128 с.
2. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.
3. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
4. Милованов А.Ф. Огнесохранность железобетонных конструкций после пожара / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 2005. – 120 с.
5. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / Ройтман В.М. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». 2001. – 382 с.
6. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
7. Огнестойкость зданий / Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. / Под общ. ред. В.А. Пчелинцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1970. – 262 с.
8. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
9. Здания и сооружения и их устойчивость при пожаре / [Демехин В.Н., Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф. и др.] – М.: ГПС МЧС России, 2003. – 656 с.
10. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.
11. Соломин В.М. Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций / Соломин В.М. – М.: Машиностроение, 1980. – 128 с.
12. Ильин Н.А. Техническая экспертиза зданий, поврежденных пожаром / Ильин Н.А. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
13. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции / Ильин Н.А. – М.: Стройиздат, 1979. – 128 с.
14. Яковлев А.И. Огнестойкость железобетонных конструкций / Яковлев А.И. // Пожарная профилактика и тушение пожаров : [информац. сб. ВНИИПО]. – М.: Стройиздат, 1970. – № 6. – С. 18–26.
15. Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций : [пособие к СниП II-2-80 / зав. ред. Бальян Л.Г. и др.] – М.: НИИЖБ, 1986. – 40 с.
16. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром : – М.: Стройиздат, 1987. – 80 с.
17. Зенков Н.И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара [учебн. для слуш-лей вузов] / Зенков Н.И. – М.: ВИПТШ, 1974. – 176 с.
18. Стрельчук Н.А. Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве / Стрельчук Н.А. – М.: Стройиздат, 1970. – 128 с.
19. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве : [2-е изд., перераб. и доп.] / Ройтман М.Я. – М.: Стройиздат, 1985. – 596 с.

20. Романенков И.Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов / Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. -М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.

21. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2002 [Чинний від 2003-05-01.]. – К.: Видавництво “Лібра”, 2003. – 87 с – (Національний стандарт України).

22. 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).

23. Захист від пожежі. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість. ДСТУ Б В.1.1-19-2007. [Чинний від 2007-06-15.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 29 с – (Національний стандарт України).

24. Захист від пожежі. Колони. Метод випробування на вогнестійкість. ДСТУ Б В.1.1-14-2007. [Чинний від 2007-06-15.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 12 с – (Національний стандарт України).

25. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. (ISO 834: 1975) ГОСТ 30247.0-94. [Введен в действие 1996-01-01] – М.: Стройиздат, 2003. – 7с. – (Национальный стандарт РФ).

26. Fischer R. Uber Verhalten von Entmortel und beton bei hoheren temperaturen. Berlin, 1970, Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. – P. 214.

27. Fischer R., Welgler H. Beton bei temperaturen von 100 bis 750 °C, Darmstadt, 1967. – P. 283.

28. Lea F.C. Comportement du beton entre 80 et 300 °C, 1976, № 18. – P. 136.

29. Gerhardt H. Design Method of Smoke and Heat exhaust Systems in construction Works. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 127–140.

30. Kowalski R., Górska B. Badanie zmian strukturalnych betonu narażonego na działanie wysokich temperatur. Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 315–322.

31. Lie T.T. Characteristic temperature curves for various fire severities. "Fire Technol", 1974, 10, № 4. – P. 315–326.

32. Lie T.T. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members. International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety, 22/23, February 1983/pp.139-153.

33. Ruvalcaba Ayala F.R. Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy. – 2010. – 294 p.

34. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 141–150.

35. Harmathy T.Z. Fire resistance versus flame spread resistance. – Fire Technol., 1976, v. 12, N 4. – P. 290–302.

36. K. Oden. – Fire resistance of glued, laminated timber structures. Fires. Res. Org. Simp. n°3. Paper n° 2. H.M. Stationery Office. London England pp. 7–15, 1970.

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

38. ISO 834-75 Fire resistance test. Elements of building constructions. European Committee for Standardization, Brussels, 2000.

39. EN 13501-1:2002 “Fire classification of construction products and building elements” – Part 1.2. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.

40. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.

41. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. СТО 36554501-006-2006 – [Введен в действие 1996-01-01] – М.: Стройиздат, 2006. – 77 с. – (Национальный стандарт РФ).

42. 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).

43. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход) / Круковский П.Г. – К.: НАНУ Институт технической теплофизики, 1998. – 224 с.

44. Грасник А. Предупреждение дефектов в строительстве. Защита материалов и конструкций / Грасник А., Грюн Э., Фикс В., Хольцапфель В., Ротер Х.; Пер. с англ. В.П. Самойлова – 1981. – 184 с.

45. Страхов В.Л. Оптимальное проектирование огнестойких строительных конструкций. / Моделирование пожаров и взрывов [под ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко]. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 365 – 442.

46. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия / Кричевский А.П. – М.: Стройиздат, 1984. – 148 с.

47. Яковлев А.И. Пожарная профилактика / Яковлев А.И., Сорокин А.Н. – М.: ВНИПО. – 1979. – Вып. 7. – С. 37–41.

48. Яковлев А.И. Огнестойкость одноэтажных производственных зданий в зависимости от пожарной нагрузки / Яковлев А.И., Стороженко Т.Е. // Промышленное строительство. – 1979. № 9. - С. 37-39.

49. Яковлев А.И. Расчет предела огнестойкости сжатых армосиликатобетонных конструкций с учетом деформативности нагретого бетона на основе использования ЭВМ. / Яковлев А.И., Апостолов А.Т. // Огнестойкость строительных конструкций. – Вып. 2. – 1974. – С. 3–24.

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

51. Фомин С.Л. Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища: автореф. дис-ї на здоб. наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека». / С.Л. Фомін. – Харків, 1997. – 38 с.

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

53.Фомин С.Л. Полная диаграмма “ $\sigma$ - $\epsilon$ ” бетона и арматуры при нагреве / Фомин С.Л. // Коммунальное хозяйство городов. Республик. [межведомственный науч.-техн. сб.] – К.: Техніка, 1997. – Вып. 8. – С. 27–29.

54.Фомин С.Л. Огнестойкость и остаточная прочность железобетонных конструкций / Фомин С.Л. // Материалы первой всеукраинской научно-технической конференции «Научно-практические проблемы современного железобетона». – К.: 1996. – С. 183–185.

55.Фомин С.Л. Диаграмма состояния арматуры для расчета железобетонных конструкций при нормальных и высоких температурах / Фомин С.Л. // Будівельні конструкції : [міжвідомч. наук.-техн. збірник] — К.: НДІБК, 2005. – Т. 1 – С. 372–379.

56. Фомин С.Л. Огнестойкость многоэтажных каркасных зданий/ Фомин С.Л. // Будівельні конструкції : [міжвідомч. наук.-техн. збірник] – К.: НДІБК, 2005. – Т. 2 – С. 310–315.

57.Фомин С.Л. Расчет железобетонных конструкций на температурно-влажностные воздействия технологической и климатической среды : [учеб. пособие] / Фомин С.Л. – К.: УМК ВО, 1992. – 164 с.

58.Григорян Б.Б. Огнестойкость сжатых железобетонных элементов при температурных режимах близких к реальным: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.01 / Борис Бахшиевич Григорян. – Х., 2001. – 168 с.

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

60.EN 1996-1-2:2005 Eurocode 6: Design of masonry structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.

61.Левитский В.Е. Диаграммный метод решения статической задачи расчета огнестойкости железобетонных конструкций: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.01 / Левитский Валерий Евгеньевич. – Москва., 2004. – 217 с.

62.Яковлев А.И. Стены

63.Касперов Г.И. Нормативная база по определению огнестойкости железобетонных конструкций / Касперов Г.И., Полевода И.И. // Сб. мат-лов междунар. науч.-практ. конф-и «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». – Минск: КИИ, 2001. – С. 38–39.

64.Гейтвуд Б.Н. Температурные напряжения / Гейтвуд Б.Н.; пер. с англ. В.Р. Акопова. – М.: Машгиз 1959. – 268 с.

65.Поздеев С.В. Развитие научных основ определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций: дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02 / Поздеев Сергей Валерьевич. – Черкассы, 2012. – 360 с.

66. Поздеев С.В. Математическое моделирование поведения железобетонной балки во время пожара при помощи метода конечных элементов /

Поздеев С.В., Тищенко И.Ю. // Пожаровзрывобезопасность. Научно-технический журнал. – ООО «Издательство «Пожнаука», 2010 – Том 19 – №1. – С. 20-27.

67. Поздеев С.В. Дослідження ефективності математичних моделей теплопередачі для розв'язку теплотехнічної задачі при визначенні вогнестійкості залізобетонних конструкцій / Поздеев С.В., Тищенко О.М. // Черкаси: Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 5. – 2010. – С. 122-129.

68. Поздеев С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних плит. / Поздеев С.В. // Черкаси: Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 6. – 2010. – С. 125-133.

69. Поздеев С.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонной балки при пожаре. / Поздеев С.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ. – Вып. 27. – 2010. – С. 163–174.

70. Поздеев С.В. Экспериментально-расчетный метод определения механических характеристик бетона в условиях нагрева. / Поздеев С.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ.–Вып. 28.– 2010. – С. 133–140.

71. Поздеев С.В. Исследование эффективности расчетных методов для определения предела огнестойкости преднапряженной ребристой железобетонной плиты. / Поздеев С.В. // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. –К.: УкрНДІПБ, 2010. – № 2 (24). – С.5 – 11.

72. Поздеев С.В. Дослідження ефективності вогнезахисної обробки залізобетонних балок покриттями, що спучуються. / Поздеев С.В. // Вісник житомирського державного технологічного університету. – Житомир: ЖДТУ, 2010. - №3(54). – С.12 – 16.

73. Поздеев С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних балок. / Поздеев С.В. // Пожежна безпека : [зб. наук. праць]. – Л.: ЛДУБЖД. – № 17. – 2010. – С. 115–122.

74. Поздеев С.В. Дослідження адекватності результатів математичного моделювання тепломасообміну у вогневій печі при випробуваннях залізобетонної плити на вогнестійкість. / Поздеев С.В. // Черкаси: Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 6/1. – 2010. – С. 60 – 65.

75. Поздеев С.В. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. / Поздеев С.В., Левченко А.Д. // Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка». – Львів: НТУ «Львівська політехніка». - 2011. – С. 264 - 269

76. Поздеев С.В. Определение предела огнестойкости преднапряженной ребристой железобетонной плиты уточненным расчетным методом. / Поздеев С.В. // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – Минск.: КИИ МЧС Республики Беларусь. – № 1(13). – 2011. – С. 53–60.

77.Ройтман В.М. Решение теплотехнической задачи огнестойкости конструкций с учетом процессов влагопереноса на ЭВМ по неявной конечно-разностной схеме / Ройтман В.М., Зырина Г.Н. // Огнестойкость строительных конструкций : [сб. тр. ВНИИПО МВД СССР]. – М.: ВНИИПО, 1974. – Вып. 2. – С. 58–71.

78.Ройтман В.М. Возможности прогнозирования и регулирования огнестойкости строительных материалов и конструкций на основе кинетического подхода / Ройтман В.М. // Пути повышения огнестойкости строительных материалов и конструкций. – М.: Знание, 1982. – С. 63–67.

79.Кошмаров Ю.А. Новые методы расчета огнестойкости и огнезащиты современных зданий и сооружений / Кошмаров Ю.А. // Пожарная безопасность. – М.: ВНИИПО, 2002. – № 2. – С. 91–98.

80.Страхов В.Л. Пути повышения эффективности огнезащиты строительных конструкций и воздуховодов / Страхов В.Л., Мельников А.С., Рудаков А.П., Смирнов Н.В. // Пожарная безопасность. – М.: ВНИИПО, 2004. – № 3. – С. 64-68.

81. Давыдкин Н.Ф. Оценка огнестойкости зданий и сооружений на основе компьютерного моделирования / Давыдкин Н.Ф., Каледин В.О., Страхов В.Л. // Математическое моделирование. – 2000. – С. 27–32.

82. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности : [в 2-х т.] / Мацевитый Ю.М. – Т. 1 : Методология. – К.: Наукова думка, 2002. – 408 с.

83. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1971. – 554 с.

84. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / Самарский А.А., Вабищевич П.Н. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

85. Власова Е.А. Приближенные методы математической физики : [учебн. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко] / Власова Е.А., Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001. – 700 с.

86. Огнестойкость зданий / Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. / Под общ. ред. В.А. Пчелинцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1970. – 262 с.

87.Жакин И.А. Несущая способность сталебетонных колонн при силовых и интенсивных температурных воздействиях: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.01 / Жакин Иван Анатольевич. - Х., 2004. – 194 с.

88.Поздеев С.В. Удосконалення експериментально-розрахункової методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних колон після пожежі / Поздеев С.В., Григорян Б.Б., Поздеев А.В. // Системи обробки інформації : [збірник наукових праць]. – Х.: ХУПС, 2005. – Випуск 7(47). – С. 133 – 143.

89.Поздеев С.В. Методика определения режимов нагрева бетонных образцов, моделирующих состояние элементов строительных конструкций при пожаре / Поздеев С.В., Некора О.В., Поздеев А.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: АГЗУ. – Вып. 19. – 2006. – С. 111–116.

90. Поздеев С.В. Обґрунтування вибору режимів нагріву зразків для експериментально-розрахункового методу визначення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій / Поздеев С.В., Некора О.В., Поздеев А.В. // Пожежна безпека : [зб. наук. праць]. – Л.: ЛДУБЖД. – № 9. – 2006. – С. 125–132.

91. Поздеев С.В. Обоснование методики расчета температурных режимов прогрева камеры печи при комбинированных испытаниях бетонных образцов / Поздеев С.В., Григорян Б.Б., Некора О.В., Поздеев А.В. // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. – К.: УкрНДПБ, 2006. – № 2 (14). – С.140–147.

92. Поздеев С.В. Обоснование экспериментально-расчетной методики определения несущей способности железобетонной колонны при пожаре / Поздеев С.В., Некора О.В., Поздеев А.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ. – Вып. 21. – 2007. – С. 201–207.

93. Некора О.В. Определение несущей способности железобетонной колонны при пожаре расчетно-экспериментальным методом / Некора О.В. // Вісник ЧДТУ. – Черкаси: ЧДТУ, 2006. – № 4. – С. 15–20.

94. Некора О.В. Расчетно-экспериментальный метод определения огнестойкости сжатых элементов железобетонных строительных конструкций: дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Некора Ольга Валерьевна. – Черкассы, 2008. – 147 с.

95. Бек Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности / Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клер Ч. ; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 319 с.

96. Алифанов А.М. Обратные задачи теплообмена / Алифанов А.М. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.

97. Поршнев С.В. Численные методы на базе Mathcad / Поршнев С.В., Беленкова И.В. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 464 с.

98. Дьяконов В.П. MATHCAD 8/2000 : [спец. справочник.] / Дьяконов В.П. – СПб: Питер, 2000. – 592 с.

99. Очков В.Ф. Mathcad 7 Pro для студентов и инженеров / Очков В.Ф. – М.: Компьютер Press, 1988. – 128 с.

100. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad : [учебн. курс] / Макаров Е.Г. – СПб: Питер, 2003. – 448 с.

101. Сопротивление материалов / [Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. и др.] ; под ред. Г.С. Писаренко. – [5-е изд., перераб. и доп.] – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.

102. Бахвалов Н.С. Численные методы / Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. – М.: Высшая школа, 1991. – 630 с.

103. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Карпенко Н.И. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

104. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона : [монография] / Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. – Одесса: ОНМУ, 2007. – 110 с.

105. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / Перельмутер А.В., Сливкер В.И. – К.: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.

106. Бамбура А.Н. Развитие методов оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности железобетонных конструкций на основе реальных диаграмм деформирования материалов / Бамбура А.Н. // Материалы первой всеукраинской научно-технической конференции «Научно практические проблемы современного железобетона». – К., 1996. – С. 36 – 39.

107. Григорян Б.Б. Расчет огнестойкости сжатых железобетонных колонн со случайным эксцентриситетом при заданном режиме пожара / Григорян Б.Б. // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2000. – Вип. 10. – С. 211 – 216.

108. Григорян Б.Б. Нормирование требуемых пределов огнестойкости сжатых железобетонных колонн при реальном режиме пожара на экспериментальной основе / Григорян Б.Б. // Республиканский межведомственный научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – К.: Изд-во «Техника», 2000. – Вып. 8 – С. 27 – 29.

109. Григорян Б.Б. Метод приведения реального температурного режима к стандартному для определения огнестойкости железобетонных конструкций / Григорян Б.Б. // Проблемы пожарной безопасности : [сб. науч. трудов]. – Х.: «Фолио», 2000. – С.53 – 56.

110. Гринчик Ю.А. Поведение железобетонных конструкций в условиях реальных температурных режимов пожара / Гринчик Ю.А., Измаилов А.С., Григорян Б.Б. // Огнестойкость строительных конструкций. – Вып. 5. – 1983. – С. 91–96.

111. Жуков В.В. Термостойкость железобетонных конструкций / Жуков В.В., Панюков Э.Ф. – К.: Будівельник, 1991. – 224 с.

112. Стандарт по бетону

113. Пат. 85695 Україна, МПК(2009) G01 N 33/38. Спосіб визначення несучої здатності стиснутих елементів залізобетонних конструкцій в умовах пожежі / Поздеев С.В., Некора О.В., Вітько М.М., Поздеев А.В., заявник і патентовласник Поздеев С.В. - №а200607816 ; заявл. 12.07.06 ; опубл. 25.02.09, Бюл. №4, 2009 р.

114. Пат. 87295 Україна, МПК(2009) G01 N 33/38, G01 N 25/00. Установка для визначення несучої здатності залізобетонних колон в умовах високотемпературного нагріву/ Поздеев С.В., Некора О.В., Тищенко Є.О., Поздеев А.В., Поклонський В.Г., заявник і патентовласник Поздеев С.В. - №а200607814 ; заявл. 12.07.06 ; опубл. 10.07.09, Бюл. №13, 2009 р.

115. Поздеев С.В. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань / С.В. Поздеев, В.К. Словінський, С.Д. Щіпець // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2013. – № 14. – С. 88 – 93.

116. Поздеев С.В. Визначення температурних полів у перерізі залізобетонної колони при її випробуванні на вогнестійкість / С.В. Поздеев, В.К. Словінський, С.Д. Щіпець, А.М. Омельченко // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2013. – № 15. – С. 130 – 137.

117. Поздеев С.В. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / С.В. Поздеев, В.К. Словінський, А.Н. Омельченко, М.А. Кропива // Збірник наукових праць Української державної академії. – Х: УДАЗТ, 2013. – № 142. – С. 220 – 227.

118. Словінський В.К. Обґрунтування методу розв'язку міцнісної задачі при розрахунковій інтерпретації результатів вогневих випробувань залізобетонних колон // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. –К.: УкрНДІПБ, 2013. – № 2 (32). – С.5 – 11.



119. Поздеев С.В. Метод интерпретации данных огневых испытаний железобетонных колонн для расчетной оценки их огнестойкости / С.В. Поздеев, В.К. Словинський, С.Д. Щипець, А.Н. Омельченко // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – Минск.: КИИ МЧС Республики Беларусь. – № 1(19). – 2014. – С. 38–47.

Наукове видання

ЧЕРКАСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ  
ІМЕНІ ГЕРОЇВ ЧОРНОБИЛЯ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Щіпець Станіслав Дмитрович  
Поздєєв Сергій Валерійович  
Тищенко Євген Олександрович  
Словінський Віталій Казимирович

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА  
ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТІН

*монографія*