

Словінський В.К., Поздєєв С.В., Щіпець С.Д.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВОГНЕСТІЙКОСТІ
ЗАЛІЗОБЕТЕННИХ КОЛОН**

Черкаси
2016

Друкується відповідно до рішення
Вченої ради Черкаського інституту
пожежної безпеки імені Героїв
Чорнобиля НУЦЗ України
(протокол № від 2016 р.)

УДК 624.012

Експериментальна оцінка вогнестійкості залізобетонних колон / В.К. Словінський, С.В. Поздєєв, С.Д. Щіпець – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. – 104 с.

Описано розроблені способи побудови температурних полів за вимірними температурами у контрольних точках шляхом інтерполяції. Також удосконалена методика проведення вогневих випробувань без прикладання механічного навантаження, обґрунтована найбільш інформативна схема розташування термопар у перерізі залізобетонної колони. Обґрунтований метод розв'язку задачі міцності, заснований на деформаційній моделі та виконаний комплекс розрахунків меж вогнестійкості. Розроблені експериментальна та математичні бази методу випробувань без механічних навантажень, куди входить обґрунтування технічних вимог до умов проведення випробувань і їх метрологічного забезпечення, опис математичного апарату для інтерполяції температурних полів, методика оцінки достовірності отриманих результатів.

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

Рецензенти: доктор технічних наук, професор Осипенко В.І.

© Словінський В.К., Поздєєв С.В., Щіпець С.Д.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН.....	6
1.1. Нормування вогнестійкості залізобетонних колон.....	6
1.2. Метод вогневих випробувань залізобетонних колон	8
1.2.1. Вимоги щодо вогневих печей	9
1.2.2. Вимоги щодо опорно-навантажувальної системи	9
1.2.3. Вимоги щодо контрольно-вимірювальної системи	11
1.2.4. Вимоги щодо встановлення та розташування залізобетонних колон у печах	13
1.2.5. Температурний та силовий режими випробування.....	14
1.3. Розрахункові та експериментально-розрахункові методи визначення вогнестійкості залізобетонних колон	15
1.4. Математичні моделі поведінки залізобетонних колон в умовах пожежі	20
1.4.1. Математичні моделі теплопередачі у залізобетонних колонах в умовах пожежі	20
1.4.2. Математичні моделі силового опору залізобетонних колон при дії пожежі	25
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕМПРАТУРНОГО ПОЛЯ У ПЕРЕРІЗІ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОЛОНИ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ПОКАЗНИКАМИ У КОНТРОЛЬНИХ ТОЧКАХ	36
2.1. Апроксимація температурних розподілень за лініями розташування термопар у перерізах залізобетонних колон при дії пожежі	36
2.1.1. Експериментальні дані щодо температурних розподілів у перерізі залізобетонних колон при дії пожежі із стандартним температурним режимом	36
2.1.2. Апроксимація температурних розподілень у перерізі залізобетонних колон по лініям розташування термопар	37
2.1.3. Адекватність результатів апроксимації	39
2.2. Інтерполяція температурних розподілень по всьому перерізу залізобетонних колон за температурами ліній розташування термопар.....	42
2.2.1. Інтерполяція температурного поля в перерізі колони за фронтальними січними площинами	45
2.2.2. Інтерполяція температурного поля в перерізі колони за твірними.....	47
2.2.3. Інтерполяція температурного поля в перерізі колони за наближенням ізотерм	48
2.2.4. Результати інтерполяції температурних розподілів	50

2.3. Обґрунтування розташування контрольних точок вимірювання температури у перерізі залізобетонних колон	54
РОЗДІЛ 3. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	56
3.1. Експериментальне обладнання.....	56
3.2. Методика виготовлення та формування залізобетонних колон-зразків для випробування.....	59
3.3. Методика вогневих випробувань залізобетонних колон.....	64
3.3.1. Методика підготовки обладнання та зразків до випробувань.....	64
3.3.2. Методика проведення випробувань.....	64
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ.....	67
4.1. Результати вогневих випробувань залізобетонних колон.....	67
4.2. Інтерполяція температур у перерізі колони за результатами випробувань.....	78
4.3. Оцінка адекватності результатів інтерполяції температур.....	80
РОЗДІЛ 5. ОБґРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН.....	85
5.1. Обґрунтування методу вирішення міцнісної задачі для оцінки вогнестійкості залізобетонної колони.....	85
5.2. Алгоритм удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон квадратного перерізу.....	91
5.3. Оцінка адекватності результатів оцінки вогнестійкості залізобетонних колон за удосконаленим методом.....	92
5.4. Оцінка ефективності удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон квадратного перерізу.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	98

ВСТУП

Сучасний стан із пожежами в Україні зумовлює важливість задач щодо забезпечення відповідних нормативних вимог до пожежної безпеки будівель та споруд у тому числі щодо вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, зокрема залізобетонних колон, адже при їх відмові будівля зазнає найбільших руйнувань і відповідно найбільших соціально-економічних збитків.

Нормативними документами України визначено, що фактичні межі вогнестійкості залізобетонних колон визначаються на основі проведення вогневих випробувань, які вважаються найбільш ефективними. Тим не менш, умови проведення та подальша обробка результатів випробувань потребують удосконалення з метою підвищення їх достовірності шляхом врахування умов роботи колон як елемента структури, а також зниження працевитрат та вартості проведення експериментальних робіт.

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. Gruppe, T. Harmathy, M. Schäfer, D. Bernhart широко розглянуті методи визначення фактичних меж вогнестійкості залізобетонних колон експериментальним та розрахунковим шляхом.

Для визначення несучої здатності залізобетонних колон під час пожежі і після неї є перспективним використання методів, які поєднують проведення випробувань і математичну інтерпретацію отриманих результатів, яка заснована на математичних моделях розрахункових методів. Проведення вогневих випробувань зразків, які за габаритними розмірами відповідають, або наближаються до реальних елементів конструкцій забезпечує високу достовірність результатів, а застосування розрахунку надають гнучкість і універсальність при врахуванні реальних розмірів та граничних умов за режиму роботи залізобетонної колони у складі відповідної структури при термосилової дії пожежі. Даний підхід дозволить не тільки врахувати реальні розміри і граничні умови залізобетонних колон, а також суттєво зменшити трудомісткість і вартість вогневих випробувань шляхом виключення з випробувальних установок опорно-навантажувального вузла. Таке конструктивне спрощення також дозволяє зменшити трудовитрати на установавання та центрування колони у захватах.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН

1.1. Нормування вогнестійкості залізобетонних колон

Залізобетонні колони відносяться до стиснутих елементів залізобетонних конструкцій які сприймають найбільші навантаження і є найбільш відповідальними елементами будівель та споруд, саме тому порушення загальної стійкості будівлі в умовах пожежі завжди відбувається як результат відмови цих елементів. При обваленні несучих конструкцій внаслідок руйнації залізобетонних колон, збиток досягає максимальних значень [1 – 31], це пов'язано із можливими жертвами серед населення, пошкодженням вартісного обладнання, знищенням огорожувальних та несучих конструкцій будівель та споруд. З іншого боку надійність залізобетонних колон при їх аварійній роботі в умовах пожежі дозволяє здійснити безпечну евакуацію та роботу аварійно-рятувальних підрозділів, тому до залізобетонних колон висуваються особливі вимоги щодо їх вогнестійкості.

Згідно [32 – 35] основним показником вогнестійкості залізобетонної колони є її межа вогнестійкості, що визначається часом (в хвиликах) від початку пожежі до настання втрати несучої здатності (R), оскільки колони не виконують огорожувальних функцій у будівлях. Граничний стан втрати несучої здатності залізобетонної колони пов'язується із втратою стійкості або повної руйнації. Ознакою цього стану є випучування та заголення робочої арматури колони.

Вимоги до вогнестійкості елементів будівельних конструкцій у тому числі і для залізобетонних колон визначаються згідно з умовними класами будівель та споруд які називаються ступенями вогнестійкості. 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 [32].

Таблиця 1.1

Конструктивні характеристики будівель залежно від їх ступеня вогнестійкості

Ступінь вогнестійкості	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.

Розрізняють фактичну і вимагаєму ступені вогнестійкості елементів конструкцій будівлі. Необхідний 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 [32].

В Україні мінімальні межі вогнестійкості встановлюються з урахуванням призначення будівель, поверховості, місткості, категорії виробництва щодо вибухопожежної небезпеки, наявності автоматичних установок пожежогасіння і інших чинників. В табл. 1.2 показані деякі приклади призначення вимагаємої межі вогнестійкості колон різних будівель за їх функціональним призначенням [32].

Таблиця 1.2

Необхідні межі вогнестійкості колон для різних типів будівель

Ступінь вогнестійкості	Типи будівель	Вимагаєма межа вогнестійкості (хв)
	Висотні суспільні, житлові (заввишки до 100 м)	180
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)	15
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)	15

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, ніж 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 [32 – 34], перевага при визначенні фактичних меж вогнестійкості залізобетонних колон віддається вогневим випробуванням.

1.2. Метод вогневих випробувань залізобетонних колон

Випробування залізобетонних колон на вогнестійкість відбувається у відповідності до стандартів [32 – 34]. Згідно із цими стандартами колона повинна бути піддана вогневій дії в умовах навантаження колони силовими факторами, що повністю відповідають діючому навантаженню у колоні 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, що наводиться у відповідному стандарті [34].

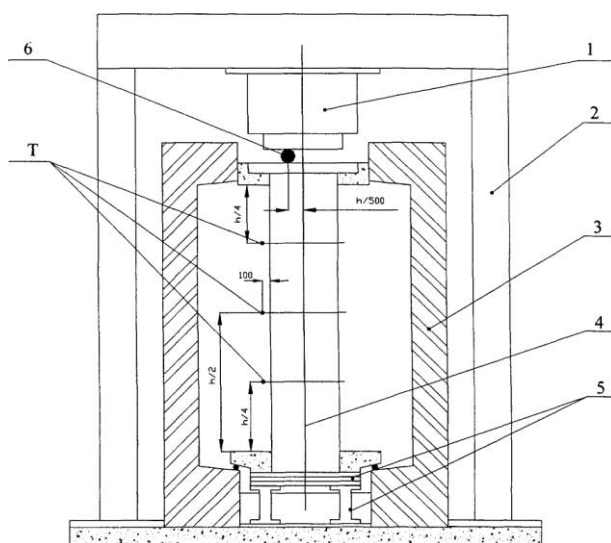


Рис. 1.1. Установка для випробування колон на вогнестійкість: 1 – гідроциліндр; 2 – стійки; 3 – огороження печі; 4 – зразок для випробувань, 5 – опорна система; 6 – шарнірна опора; Т – термопары.

Система вищевказаних стандартів повністю визначає комплекс вимог щодо конструктивних особливостей компонентів установок для випробувань, особливостей зразків, контрольної-вимірювальної арматури, порядку проведення процедур випробувань та обробки їх результатів.

1.2.1. Вимоги щодо вогневих печей

Конструкція печей має забезпечувати можливість нагріву колон, стійок, стовпів та інших стержневих конструкцій з чотирьох боків [33, 34]. Розміри печей мають бути такими, щоб забезпечити можливість проведення випробувань зразків, розміри яких відповідають проектним розмірам будівельних конструкцій. У випадку, якщо це зробити неможливо стандартом [34] передбачена мінімальна висота колони, яка складає 3000 мм, що відповідає мінімальній висоті вогневої камери печі.

Футеровка печі повинна мати товщину не меншу за 50 мм. Матеріал футеровки повинен забезпечувати достатню термоізоляцію камери, причому теплова інерція при його нагріванні до температури 500 °С повинна задовольняти такій умові:

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

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

ρ - густина, кг/м^3 ;

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

Нагрівальна система також має відповідати комплексу вимог: по-перше, вона повинна включати автоматичну паливно-форсункову систему на рідкому паливі (гасі, дизпаливі); по-друге, пальники (форсунки) мають синхронно включатися із максимальною різницею у 60 с; по-третє, факели, що формуються форсунками у каналах, не повинні торкатися обігріваних поверхонь.

Якщо проаналізувати комплекс вимог до печей можна прийти до висновку, що цей комплекс не є повним і має деякі недоліки. Немає чітких вимог до пальникової та вентиляційної системи для забезпечення рівномірного обігріву та обтікання пічними газами випробуваної колони, нема вимог до конструкцій печей для забезпечення уніфікації вимірювань, відсутнє обґрунтування максимальної довжини випробуваної колони.

1.2.2. Вимоги щодо опорно-навантажувальної системи

Конструкція опорно-навантажувальної системи має забезпечити випробування зразків колон під навантаженням. Але в багатьох відомих конструкціях печей система здійснення навантаження є відсутньою і тому стандартом [34] допускається проводити випробування на вогнестійкість без навантаження зразків металевих колон з вогнезахисним покриттям та облицюванням, а також зразки інших колон, для яких неможливо під час випробувань відтворити в лабораторії умови навантаження, прийняті у розрахунковій схемі, через технічні причини.

Опорно-навантажувальна система повинна включати у себе засоби, що забезпечують установку та центрування зразка в печі для забезпечення рівномірного обігріву і розподілу навантаження, а також прикладання навантаження на зразок відповідно до технічної документації на зразок через сталеві пластини. Також означена система включає у себе засоби, що

забезпечують захист навантажувального обладнання від нагрівання, наприклад, спеціальні муфти з ущільненням, які встановлюють на кінці зразка. Ці засоби повинні забезпечувати ізоляцію кінців 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 кінців зразка.

Обладнання для навантаження зразка має відтворювати умови роботи колони, 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 втрати зразком несучої здатності.

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 при шарнірному опиранні одного і жорсткому защемленні іншого кінця, жорсткому защемленні обох кінців зразка або іншим способом, що найбільше відтворює реальні умови роботи колони.

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

При висуванні перелічених вимог деякі важливі моменти не регламентуються. Основним недоліком даного комплексу вимог є дозвіл, що надається замовнику випробовувати залізобетонні колони без навантаження без чітких вимог до обґрунтування критеріальної бази щодо настання граничного стану втрати несучої здатності внаслідок вогневої дії нагрівальної системи печі. При випробуванні колони також замовнику надається право здійснювати заміну діючих навантажень згідно із розрахунковою схемою на еквівалентні навантаження, які можуть бути прикладені з боку опорно-навантажувальної системи. До недоліків слід віднести відсутність вимог до центрування колони, яка піддається вогневому впливу без навантаження у печі без опорно-навантажувальної системи з метою забезпечення рівномірності обігріву. Також недоліком є відсутність вимог до способу прикладення навантажень та центрування колони у захватах, оскільки це процес взаємопов'язаний і повинен протікати покроково.

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. Вимоги щодо контрольно-вимірювальної системи

Система контролю та вимірювання параметрів, що підлягають визначенню у ході експерименту в установках для випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон, складається з декількох груп приладів, які мають спеціальне призначення. Перша група об'єднує прилади для вимірювання температури у контрольних точках простору камери печі та залізобетонної колони, що випробовується.

До приладів означеної групи висуваються два типи вимог. Перший тип стосується їхнього розташування. Стандартом [34] передбачено при вимірюванні температури в печі в області зразка колони, що випробовується, встановлення в печі 6 термопар на відстані від 90 мм до 110 мм від поверхонь зразка. Термопари розміщують уздовж висоти зразка на відстані 1/4, 1/2, 3/4 по одній з кожної сторони симетрично відносно один до одного. Термопари встановлюють посередині висоти зразка колони по одній з кожної сторони на відстані від 90 мм до 110 мм від стінок колони. Відстань від вимірювального спаю термопар до стінок печі має бути не менше 200 мм. Схема розташування термопар у просторі печі подана на рис. 1.1.

Для залізобетонних колон, 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 залізобетонних колон також необхідно встановити з кожного боку не менше трьох термопар рівномірно по його висоті на арматурі, яка найбільш наближена до поверхонь зразка.

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.

Другий тип вимог стосується конструкції та типу вимірювальних пристроїв (термопар). Згідно зі стандартами [33, 34] для вимірювання температури у печі можуть застосовуватися термопари з неізолюваними 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 показано схематичне зображення термопари з захисним кожухом, що призначена для вимірювання температури в печі. Вимірювальний спай термопари повинен бути звареним.

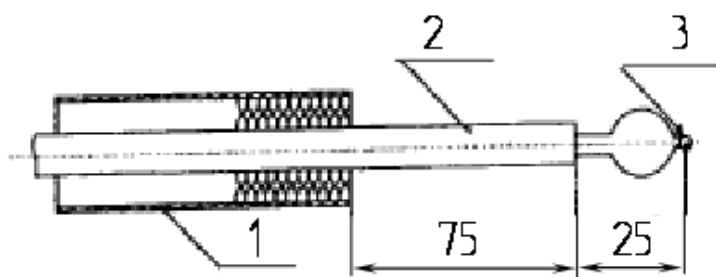


Рис. 1.2. Конструктивна схема термопар для вогневих випробувань: 1 – теплозахисна оболонка; 2 – захисний кожух; 3 – вимірювальний спай.

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

Таблиця 1.3

Вимоги до технічних параметрів термопар

Призначення	Діаметр дроту, мм	Тип термопар	Діапазон вимірювання, °С	Похибка, °С
Вимірювання температури у просторі печі	≤ 1,5	ТХА	0 – 1300	± 15
Вимірювання температури у з/б колоні	≤ 0,75	ТХА	0 – 600	± 10

Перелічені вимоги дозволяють ефективно контролювати температуру у просторі камери вогневої печі. Вимоги стандартів [33 – 35] щодо розташування і технічних характеристик термопар на поверхні та у внутрішніх шарах залізобетонних колон, що піддаються випробуванням, не можуть повністю забезпечити якісний контроль температури. Причиною цього є ряд недоліків.

До цих недоліків слід віднести наступне:

- немає чіткого критерію розташування термопар у перерізі колони;
- немає обґрунтованих критеріїв щодо розташування термопар на поверхні колон по довжині колони;
- верхня границя діапазону вимірювання температури у перерізах залізобетонних колон є низькою;
- похибка, що закладається при вимірюваннях температури у перерізах залізобетонних колон є необґрунтовано великою.

До другої групи входять контрольно-вимірювальні прилади для визначення деформаційно-силових характеристик напруженого стану колон під час випробування. При випробуваннях з прикладанням механічного навантаження вимірюється сила, що прикладається до захватів та продольні і поперечні

переміщення колони. Для цих вимірювань використовуються прилади, технічні характеристики яких подані у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Вимоги до технічних параметрів пристроїв для контролю параметрів напружено деформованого стану колон

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

Стосовно вимог деформаційно-силових контрольних-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 колони, немає чітких вимог, щодо положення точок, в яких визначаються переміщення, немає чітких вимог щодо типу деформацій, що вимірюються.

1.2.4. Вимоги щодо встановлення та розташування залізобетонних колон у печях

Особливістю вимог стандартів [33, 34] до встановлення зразка є допущення можливості випробувань зразка без навантаження за умови узгодження таких випробувань із замовником. При цьому настання граничного стану фіксується за температурою нагріву арматури з використанням критерію «критична температура».

При випробуваннях залізобетонних колон без прикладання навантаження торці колон для забезпечення відповідних умов нагрівання ізолюється захисним покриттям не менше ніж 50 мм та густиною не менше ніж 100 кг/м³.

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

Враховуючі вказані особливості, можна зазначити, що випробування залізобетонних колон без навантаження повинно бути обґрунтовано, оскільки при такому способі випробувань не враховується величина діючого навантаження, міцність і тип бетону та арматурної сталі, довжина, гнучкість колон та ін. Крім цього, можливість одночасного випробування декількох колон також повинна бути обґрунтована, так само як і взаємне розташування цих колон.

1.2.5. Температурний та силовий режим випробування

Температурний режим випробування пов'язується із температурними режимами пожеж – зміни середньо об'ємної температури пожежного середовища, в залежності від часу тривалості пожежі. Температурні режими реальних пожеж в приміщеннях різних будівель можуть суттєво відрізнятися один від одного [4, 24 – 28, 36, 37]. Вони залежать від кількості та складу пожежного навантаження; площі поверхні горючих матеріалів; площею й висотою віконних прорізів; будівельними характеристиками приміщень. Також слід зазначити що пожежа має щонайменше три характерні стадії [1 – 31]: початкової стадії, стадії повного розвитку та стадії згасання Температурний режим випробування має усереджувати результати досліджень пожеж у той же час створювати достатньо жорсткі умови, щоб досліджувані конструкції мали певний запас міцності при всіх можливих сценаріях пожежі. На рис. 1.3. показані температурні режими, які можуть використовуватися при вогневих випробувань будівельних конструкцій у залежності від специфіки будівельних об'єктів, де вони використовуються.

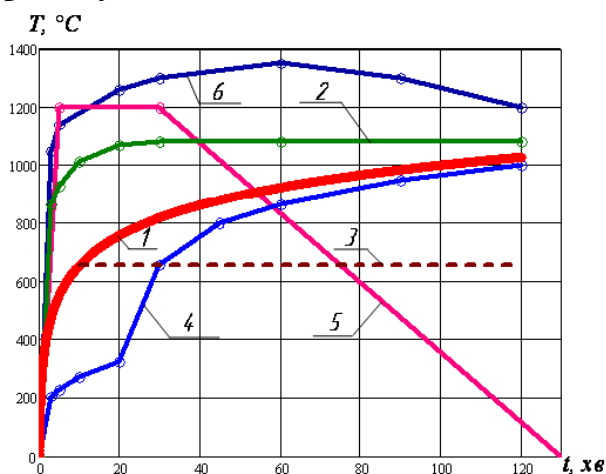


Рис. 1.3. Температурні режими випробувань конструкцій: 1 – єдина стандартна температурна крива пожежі за ISO 834 та ДСТУ Б.В 1.1.4 - 98; 2 – вуглеводнева крива за EN 1363-2:1999; 3 – мінімізована стандартна крива за ISO 834; 4 – крива тліючої пожежі за EN 1363-2:1999; 5 – тунельна крива за стандартами Німеччини (RABT); 6 – тунельна крива за стандартами Нідерландів (RWS).

За відсутності особливих умов, в яких працюють досліджувані конструкції, для випробувань на вогнестійкість використовується стандартна температурна крива пожежі (див. рис. 1.3, крива №1). Означена крива усереджує 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:

$$T_p(\tau) = 345 \cdot \lg(8\tau + 1) + T_0 \quad (1.1)$$

де: τ – час стандартного вогневого випробування, хв;

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

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

Важливою особливістю при створенні температурного режиму випробувань є вимоги стандартів [33 – 36] 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. 1.4.

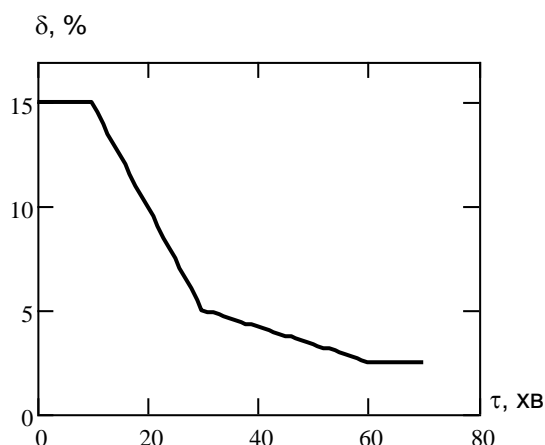


Рис. 1.4. Залежність похибки температурного режиму випробування від часу.

Вимоги до силового режиму випробування згідно з [33, 34] полягають, 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 [33 – 35], серед яких треба вказати на можливість реалізовувати тільки центральний стиск колон, лише один тип їх закріплення, багато реальних установок взагалі не передбачають прикладання силових навантажень. Крім цього вимоги стандартів зовсім не регламентують спосіб та послідовність навантаження, допустимої похибки при центруванні.

1.3. Розрахункові та експериментально-розрахункові методи визначення вогнестійкості залізобетонних колон

Згідно з відомостями про експериментальний метод дослідження вогнестійкості залізобетонних колон за допомогою вогневих випробувань, що викладені вище, треба зазначити, що при багатьох перевагах цього метода вказані недоліки і самого метода і вимог нормативних документів до його реалізації

ставлять під сумнів коректність його застосування для багатьох випадків. Ці недоліки у певній мірі не властиві розрахунковим методам, які застосовуються на стадії проектування будівель і споруд [1 – 31, 38 - 58].

Формально задача визначення меж вогнестійкості є задачею термомеханіки і у загальній постановці розуміє застосування системи рівнянь, що описує напружено-деформований стан (НДС) залізобетонних колон в умовах термічної дії пожежі, у сумісній формі разом із рівняннями, які описують теплопередачу. Розв'язок цієї системи рівнянь є достатньо складним і в аналітичному вигляді у даному випадку не існує [59]. Тому для розрахунку меж вогнестійкості залізобетонних колон існує декілька підходів, серед яких є підходи, що можуть включати розгляд напружено-деформованого стану в умовах нагрівання, а можуть і не включати його. Останній підхід реалізований при застосуванні методів, що дозволяють оцінку меж вогнестійкості за аналогією. Дані методи засновані на узагальненні великого обсягу експериментального матеріалу вигляді таблиць, які для залізобетонних колон за конструктивними особливостями ставлять у відповідність величину межі вогнестійкості. Всі інші розрахункові методи так чи інакше використовують математичні моделі, що мають ієрархічну структуру, на одному з нижчих рівнів якої стоять моделі стержнєвої механіки, а на найвищому – моделі об'ємного напружено-деформованого стану [1 – 31, 38 – 58]. У відповідності із цим за рівнем складності ці розрахункові методи умовно розділяються на спрощені та уточнені.

На рис. 1.5. подана структурна схема спрощених розрахункових методів визначення меж вогнестійкості залізобетонних колон.

Спрощені методи не вимагають складних розрахунків, реалізуються при мінімумі початкових даних, тому набули найширше поширення, а їх процедури увійшли до наборів стандартних методик відповідних норм багатьох провідних держав [38 – 40].



Рис. 1.5. Структурна схема спрощених розрахункових методів визначення вогнестійкості залізобетонних колон

Проте дані методи мають серйозний недолік, який полягає у виникненні істотних похибок результатів розрахунків (порядку 25 – 30%) [58]. Виникаючі похибки обумовлені простотою моделей, що використовуються, і недостатньою гнучкістю початкових даних, що не враховують технологічну спадковість залізобетону. В деяких випадках при табличному методі або методі критичної температури навіть не враховуються діючі навантаження.

Уточненими розрахунковими методами визначення ФМВ називаються методи, при застосуванні яких залізобетонні конструкції розглядаються як масивні елементи із використанням систем диференціальних рівнянь пружно-пластичного 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 [60 – 70], 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. На рис. 1.6 та рис. 1.7 показаний алгоритм, який можна застосовувати при розв'язку даної задачі за уточненими методами.

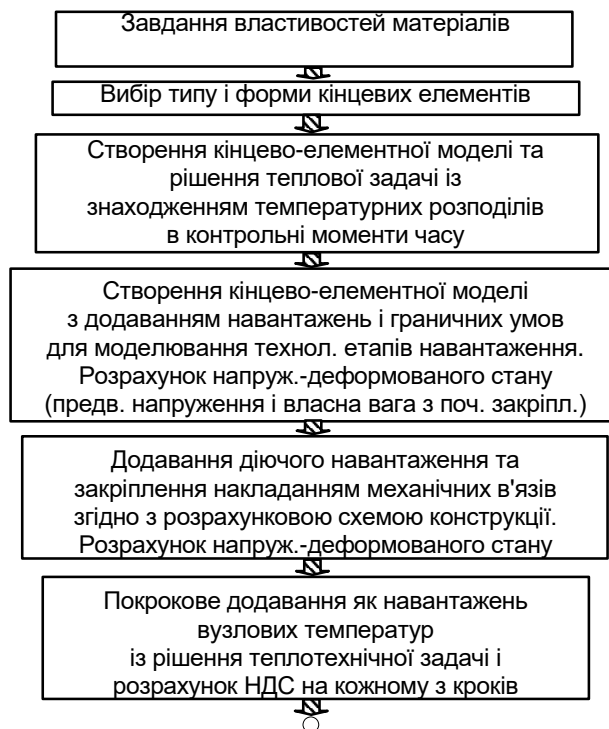


Рис. 1.6. Структурна схема-прототип розрахункових процедур уточненого метода.

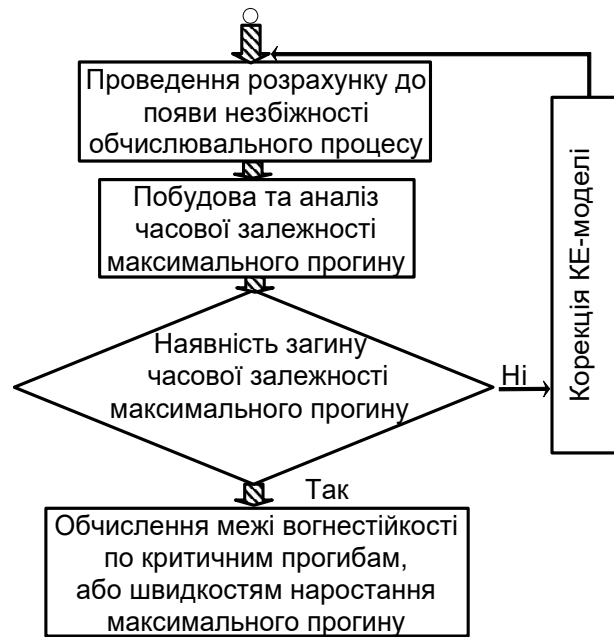


Рис. 1.7. Структурна схема визначення межі вогнестійкості за розрахованими параметрами.

Важливою перевагою даних методів є те, що при їх реалізації можна отримати комплекс просторово-часових даних, які дозволяють проаналізувати причини і сценарії руйнування конструкцій. Окрім цього, вони володіють більш високою точністю і наочністю, ніж спрощені методи, а також дають можливість більш жорстко проконтролювати достовірність одержуваних результатів.

Недоліками даних методів є обмеження при врахуванні технологічної спадковості залізобетону і пов'язана з нею похибка, складність і громіздкість обчислювальних операцій, що вимагають високої кваліфікації персоналу, а також обмеження у застосуванні спеціалізованого програмного забезпечення у зв'язку з його високою вартістю.

Для визначення ФМВ також ефективно застосовуються експериментально-розрахункові методи.

Сутність всіх експериментально-розрахункових методів полягає в проведенні комплексу лабораторних випробувань малих зразків і подальшою математичною обробкою одержаних результатів з метою їх відповідної інтерпретації. Добре відомі і широко використовуються у практиці експериментально-розрахункові методи [41 – 43, 70], засновані на ідентифікації ефективних теплофізичних характеристик (ТФХ) бетону при проведенні експериментів по нагріву зразків з реалізацією його різних режимів, геометричних умов (ГУ) і геометричної конфігурації випробовуваних бетонних зразків. ТФХ, що при цьому ідентифікуються, можуть бути одержані як коефіцієнти рівняння теплопровідності в чистому вигляді [41 – 43], або як відповідні фізичні параметри систем диференціальних рівнянь теорії сушки [41, 42, 72, 76]. Вказані методи є

ефективними, оскільки дозволяють врахувати феноменологію технологічної спадковості залізобетону прямим чином на основі порівняно недорогих і мало трудомістких експериментів. Проте, при визначенні вогнестійкості несучих конструкцій їх застосування обмежено внаслідок того, що при цьому міцнісні характеристики залізобетону не ідентифікуються, а це приводить до появи значних похибок. Крім того, дані методи застосовуються в комплексі із спрощеними розрахунковими методами при рішенні міцнісної задачі.

В роботах [60 – 70] розвинений ефективний метод заснований не тільки на ідентифікації ТФХ, а і на ідентифікації міцнісних характеристик арматурної сталі і бетону в умовах нагріву у вигляді їх коефіцієнтів роботи. При цьому даний метод є більш точним, але його основний недолік полягає у використанні складніших математичних моделей НДС залізобетону в умовах пожежі, що вимагають великої кількості розрахункових процедур, а також високої кваліфікації персоналу, що здійснює розрахунки.

Заслуговує уваги експериментально-розрахунковий метод, розвинений в роботах [60]. Даний метод ґрунтується на представленні перерізів стиснутих елементів дискретними моделями з його фізичним розділенням на відповідні зразки, що моделюють внутрішні шари бетону. Кожний із зразків піддається комбінованій силовій і температурній дії, яку відчуває відповідний шар усередині перерізу. При цьому спочатку ідентифікуються ТФХ бетону, потім розраховуються режими термосилової дії для реалізації еквівалентного режиму за допомогою експериментального устаткування, після цього отримані результати випробувань підлягають математичній обробці, внаслідок чого ФМВ визначається за обчисленими інтегральними критеріями.

Окрім спільних переваг експериментально-розрахункових методів зазначений метод дозволяє отримати результати на основі простих математичних виразів, може бути легко автоматизований і не вимагає високої кваліфікації персоналу.

Основним недоліком даного методу є відсутність універсальності, оскільки він може бути застосований тільки для стиснутих елементів залізобетонних конструкцій. На наш погляд усунення даного недоліку може бути вирішеною задачею, якщо врахувати, що при розгляді схем руйнування втрата несучої здатності зігнутих елементів конструкцій при пожежі настає при вичерпанні ресурсу опору в стиснутій зоні бетону унаслідок зменшення опору деформації арматурної сталі, що не має розкиду теплофізичних і міцнісних параметрів через технологічну спадковість.

Спільним недоліком експериментально-розрахункових методів є необхідність використання малих зразків для випробувань, що викликає необхідність додаткового дослідження переходу від цих зразків до реальних конструкцій. Ці дослідження відбуваються на основі проведення значної експериментальної роботи, включаючи випробування елементів реальних конструкцій. Іншим серйозним недоліком є відсутність єдиних вимог до

експериментального обладнання, для реалізації режиму випробувань, що враховував би граничні ефекти: тертя торців зразків, вплив тріщинуватої структури зразка, вплив нерівномірності нагріву та ін.

1.4. Математичні моделі поведінки залізобетонних колон в умовах пожежі

Всі математичні моделі, що використовуються при реалізації методів визначення ФМВ несучих залізобетонних конструкцій, можна розділити на моделі, що є загальними для всіх методів і на окремі моделі, властиві певним методам або їх групам. Важливою для реалізації всіх без виключення методів, включаючи і вогневі випробування, є математична модель пожежі. Для моделювання усередненого температурного режиму в приміщенні застосовується стандартна температурна крива пожежі [32 – 39], що описується функціональною залежністю (1.1). Дана матмодель прийнята для уніфікації експериментальних і розрахункових результатів, оскільки встановлює єдині критерії для роботи елементів будівельних конструкцій при пожежі.

При постановці задачі опису термонапруженого стану залізобетону при тепловій дії пожежі слід врахувати, що формально вона є задачею термопружнопластичності. Також слід врахувати специфіку залізобетону як композитного матеріалу із специфікою того, що він у певних умовах може себе вести як конструкція [44 – 57]. Це зумовлює введення деяких загальних спрощень для розрахункових методів, які полягають в розділенні теплової і механічної задач. Таким чином, в кожному розрахунковому методі спочатку визначаються просторово-часові температурні розподіли як результат рішення теплової задачі, а потім комплекс параметрів НДС залізобетону при прикладанні температурних розподілів в якості додаткового навантаження. Такий підхід є обґрунтованим за наявності даних, що параметри НДС слабо впливають на ТФХ і ГУ теплової задачі.

1.4.1. Математичні моделі теплопередачі у залізобетонних колонах в умовах пожежі

Математичні моделі теплопередачі так само як і моделі напружено деформованого стану мають ієрархічну структуру. На самих нижчих рівнях при побудованні математичної моделі користуються такими гіпотезами:

- при розрахунку враховується градієнт температурних розподілів тільки по перерізу елемента;
- через велику різницю в теплопровідності арматурної сталі і бетону, теплообмін враховується тільки в бетоні;
- ТФХ бетону представляються постійними коефіцієнтами;

В цьому випадку рівняння теплопровідності записується у вигляді [1 – 3, 7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_{red} \nabla^2 T, \quad (1.2)$$

де T, t – відповідно температура і час;

a_{red} – приведений коефіцієнт температуропровідності.

Приведений коефіцієнт температуропровідності враховує зміну коефіцієнту теплопровідності та об'ємної питомої теплоємності у залежності від температури і тому визначається з усередженням цих залежностей за формулою:

$$a_{red} = \frac{\lambda}{(c_p + 0,012w)\rho_0}, \quad (1.3)$$

λ, c_p – відповідно коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємність, усереджена для діапазону температур прогрівання;

w – початкова вагова вологість;

ρ_0 – густина бетону в сухому стані.

Коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємність визначаються за залежностями, які мають такий вигляд [1 – 3, 7]:

$$\lambda = A + B \cdot T_c, \quad C = D + F \cdot T_c, \quad (1.4)$$

де A, B, D, F – сталі коефіцієнти;

T_c – середнє значення температури для діапазону випробувань, згідно з [3] воно складає 450 °С.

Дана модель є зручною тим, що вона дозволяє вирішення задачі теплопровідності за допомогою простих алгебраїчних виразів. Вона створювалася з огляду на якомога більше зменшення математичних операцій. В наш час можна сказати, що дана модель є невиправдано грубою і її використання для визначення температурних розподілів не може бути обґрунтованим.

Для створення більш точної моделі розглядаються ТФХ бетону, які змінюються у залежності від температури. В цьому випадку рівняння теплопровідності називається квазілінійним [41, 77 – 80] записується у вигляді:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T) \quad (1.5)$$

В цьому випадку важливою особливістю є те, що ТФХ усереднюються по всіх складових бетону і є ефективними характеристиками, в які закладається вплив всіх теплових процесів в бетоні за теплової дії пожежі.

Даний підхід набув найбільше поширення. Наприклад, нормативні документи [38 – 40] прямо рекомендують використання даного методу для розрахунків температурних полів в перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій. Це пояснюється тим, що рівняння (1.5)

представляється у відносно простій формі, для нього добре розроблені методи рішення і програмного забезпечення.

Рівняння (1.5) вирішується при завданні ТФХ температурними залежностями. Дані залежності в даному випадку є довідковим матеріалом і можуть бути взяті з нормативних документів [38 – 40] і робіт окремих дослідників [41 – 43]. На рис. 1.8 наведені зазначені залежності для коефіцієнту теплопровідності, а на рис. 1.9 для питомої теплоємності.

На даних рисунках залежності 1 та 2 рекомендовані нормативами Євросоюзу [38] та Російської Федерації [39, 40], залежності 3 та 4 визначені окремими дослідниками. Серед них найбільш ефективними є залежності 1 коефіцієнту теплопровідності та об'ємної питомої теплоємності від температури тому що вони дозволяють врахувати характерні ефекти при нагріванні бетону, наприклад, ділянка постійного значення температури близько 100 °С протягом деякого часу унаслідок випаровування вільної вологи з пор бетону.

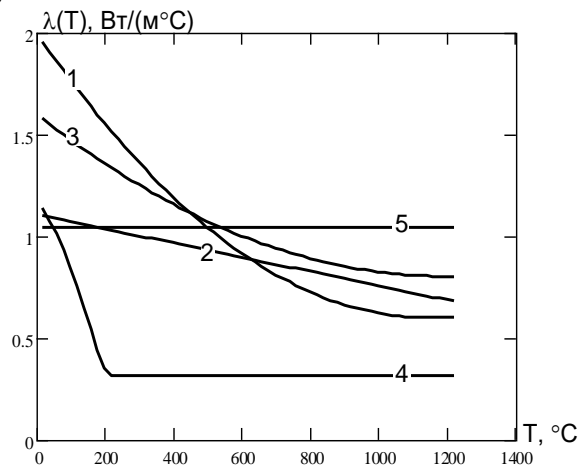


Рис. 1.8. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності: 1 – за рекомендаціями Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2005 [38]; 2 - за рекомендаціями СТО 36554501-006-2006[39]; 3 – згідно з даними роботи Т.Т. Lie [24]; 4 – згідно з даними роботи [19]; 5 - усереднені дані

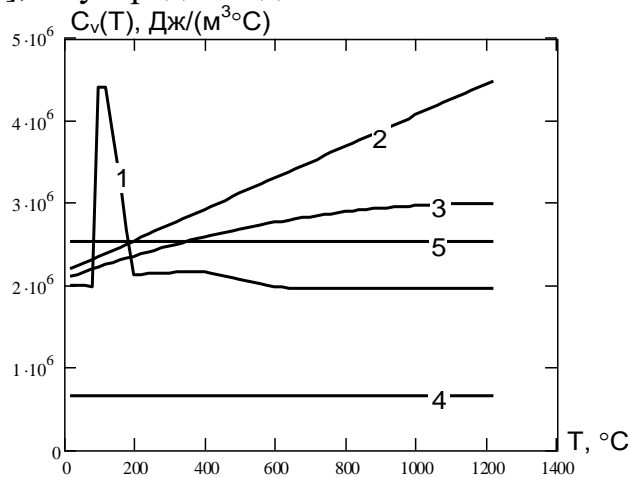


Рис. 1.9. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності: 1 – за рекомендаціями Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2005 [38]; 2 - за рекомендаціями СТО

36554501-006-2006 [39]; 3 – згідно з даними роботи Т.Т. Lie [24]; 4 – згідно з даними роботи [19]; 5 - усереднені дані

Рівняння (1.2) та (1.5) доповнюються граничними умовами III роду, які мають вигляд:

Динаміка розвитку та згасання пожежі вказує на не стаціонарність нагріву конструкцій під час пожежі, і тому для розв'язку рівняння теплопровідності використовуються граничні умови III роду [41, 77 – 80]:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_P - T_W) \quad (1.6)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·град);

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

r – поточна просторова координата.

Коефіцієнт теплообміну враховує дію конвекції та інфрачервоного випромінювання і визначається за формулою [8, 16]:

$$\alpha = \alpha_b + \alpha_k \quad (1.7)$$

де α_b – коефіцієнт теплообміну від випромінювання;

α_k – коефіцієнт теплообміну конвекцією.

Коефіцієнт α_b знаходять за формулою:

$$\alpha_b = \frac{1}{\frac{1}{C_B} + \frac{1}{\varepsilon C_S} - \frac{1}{C_S}} \cdot \frac{\left[\left(\frac{T_W + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_P + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_W - T_P}, \quad (1.8)$$

C_B – коефіцієнт випромінювання поверхні;

C_S – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε – ступень чорноти оточуючого середовища.

Коефіцієнт теплообміну конвекцією визначають за формулою:

$$\alpha_k = 1,3 \sqrt[3]{\Delta T} \quad (1.9)$$

де ΔT – різниця температур між середовищем та поверхнею.

Формула (1.9) отримана для горизонтальних поверхонь. Але вона може бути застосована для вертикальних поверхонь, так як теплообмін даному випадку всього на 6% нижчий від знайденого за формулою (1.9) [81].

Згідно рекомендаціям [81] конвективну і радіаційну складові можна визначити з виразів:

$\alpha_K = 29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – поверхня, що обігрівається;

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

$$\alpha_P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_W^4 - T_P^4}{T_W - T_P} \quad (1.10)$$

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

Даний метод є ефективним, і добре себе зарекомендував, але не може вважатися універсальним, оскільки завжди повинен доповнюватися даними експериментів. Окрім цього, модель все-таки є достатньо грубої через прийняті спрощуючі допущення.

В роботах [72, 73] запропонована більш точна математична модель. В даному випадку використовується така система рівнянь:

$$c_B \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_T \nabla T) + Q_P, \quad (1.11)$$

де ρ_0 , c_B λ_T – середня густина питома теплоємність та коефіцієнт теплопровідності пористого каркасу цементного каменю і крупного заповнювача;

Q_P – додаткова теплота, яка витрачається на нагрівання та пароутворення вільної вологи у порах цементного каменю.

Додаткова теплота Q_P визначається за формулою:

$$Q_P = r_t \rho_0 B_t \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1.12)$$

де r_t – питома теплота випаровування вологи;

B_t – вологісний коефіцієнт інтенсивності сушки, яка визначається по формулі $B_t = \partial u / \partial t$;

u – вологість бетону у відносних одиницях

Для визначення теплоти на нагрівання пари та її випаровування використовується додаткове диференціальне рівняння фільтрації пари крізь пори бетону, що має вигляд;

$$c_s \rho_0 \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(\lambda_p \nabla p) + \frac{Q_P}{r_t}, \quad (1.13)$$

де c_s λ_p – середня густина питома пароемність та коефіцієнт паропровідності бетону.

В роботах [43, 75, 76] автори пропонують враховувати у рівнянні теплопровідності окрім процесів волого переносу та випаровування зменшення густини цементного каркасу цементного каменя за рахунок його хімічного розкладання внаслідок високотемпературного нагріву, а також втрати теплової енергії на ці процеси. В цьому випадку, рівняння теплопровідності має такий вигляд:

$$(1 - \varphi)\rho'c' \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{\Sigma} \nabla T) + \sum_{i=1}^3 \dot{m}_i'' c_p \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{\beta=1}^B Q_{\beta} \dot{R}_{\beta} + r \dot{R}_k, \quad (1.14)$$

$$\nabla \dot{m}'' = \sum_{\beta=1}^B \dot{R}_{\beta} - \dot{R}_k$$

де φ – поруватість;

ρ – густина; C ,

C_p – теплоємності;

x_i – координата;

λ_{Σ} – сумарний коефіцієнт теплопровідності;

\dot{m}_i'' – компонента масової швидкості руху пари;

\dot{m}'' – вектор масової швидкості руху пари у проникному поруватому середовищі;

Q_{β} – тепловий ефект β -стадії процесу дегідратації ($\beta = 1$ – вихід адсорбованої вологи, $\beta = 2$ – вихід кристалічної води);

\dot{R}_{β} – об’ємна швидкість виділення маси на β -стадії дегідратації;

r – тепловий ефект фазаового переходу води у пароподібний стан;

\dot{R}_k – об’ємна швидкість виділення маси при конденсації пари;

індекс «'» - відповідає каркасові поруватого матеріалу;

індекс «''» - відповідає парі, що заповнює пори.

1.4.2. Математичні моделі силового опору залізобетонних колон при дії пожежі

В умовах пожежі внутрішні шари бетону залізобетонних конструкцій нагріваються до високих температур (до 1000 °C і вище), що зумовлює їх аварійну роботу. При цьому їх ресурс швидко вичерпується і вся конструкція, або її окремі елементи руйнуються. Аварійна робота залізобетонних колон в умовах пожежі відбувається у декілька етапів [1 – 6]. На першому етапі залізобетонна колона не відчуває істотних змін при цьому нарощуються поздовжні деформації розширення, що призводить до росту сил стискання і росту поперечних деформацій у перерізі. На другому етапі починається нарощування поздовжнього згину і нарощування поздовжнього переміщення верхнього кінця колони. Наявність таких ознак показує, що колона набула необоротних змін і має суттєві ушкодження. На

третьому етапі виникає стан втрати стійкості. Поперечні переміщення поздовжнього згину та продольні переміщення верхнього кінця колони лавиноподібно зростають а у певному місці утворюється зона локального ушкодження, в якому серцевина перерізу колони роздроблюється і роздроблений бетон випучує робочу арматуру. Зовнішній шар бетону обвалюється оголюючи арматуру. Наявність цих ознак показує настання граничного стану, за яким відбувається обвалення колони і зв'язаних з нею елементів конструкцій. Тобто в цей момент і фіксується втрата несучої здатності залізобетонної колони. На рис. 1.10 показані приклади залізобетонних колон з ознаками настання втрати несучої здатності внаслідок дії пожежі.



Рис. 1.10. Ознаки втрати несучої здатності залізобетонних колон унаслідок дії пожежі.

Зважаючи на ці особливості, розрахунок проводиться з урахуванням пластичних деформацій бетону і арматурної сталі.

Щоб врахувати означені явища необхідно розглянути зміну міцнісних та пружно-пластичних властивостей компонентів залізобетону. Дані властивості враховуються при закладенні у розрахунок діаграм деформування бетону і арматурної сталі [48 – 56]. На рис. 1.10 поданий приклад повної діаграми деформування бетону при його стисканні і розтязі.

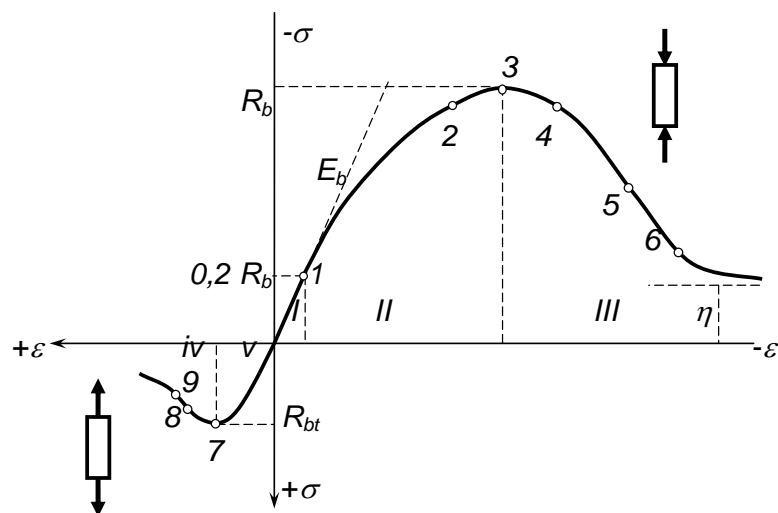


Рис. 1.11. Повна діаграма деформування бетону.

При дослідженні поведінки бетону в умовах його деформування існує два підходи. Перший підхід заснований на поступовому збільшенні навантажувальних напружень до повної руйнації зразку, яка настає в точці 3 гілки діаграми, відповідній стисканню, і в точці 7 гілки, відповідній розтягу. При цьому на гілці стискання виділяють зони I та II, а на гілці розтягу V.

Характер деформацій для стискання та розтягу дуже сильно відрізняються. При стисканні на початковому етапі (ділянка I) наявні тріщини закриваються і бетон поводить себе як пружний матеріал за рахунок пружних деформацій каркасу, зберігаючи при цьому пропорційну залежність між деформаціями та напруженнями. В точці 1 починається утворення нових тріщин і починається наступна ділянка II, для якої характерна поява псевдо пластичних деформацій, зумовлених появою і розвитком нових тріщин. В точці 2 розпочинається утворення і розвиток нестійких тріщин. Точка 3 відповідає межі міцності бетону на стискання.

Характер деформацій при розтязі зумовлений тією обставиною, що розвиток тріщин на ділянці V жодної миті не припиняється і тому відповідна гілка діаграми не має лінійної ділянки. Точка 7 відповідає межі міцності бетону на розтяг.

Спадні гілки повної діаграми деформування досліджуються при іншому підході до вимірювань при зменшенні напружень після досягнення межі міцності. Поведінка бетону на спадних гілках діаграми є дуже важливою для прогнозування роботи статично невизначених залізобетонних конструкцій, особливо при умовах прогресуючого руйнування під час пожеж та інших надзвичайних ситуацій. Точки 4, 5, 8, 9 встановлюють границі застосування спадних гілок діаграми для різних нормативів. Точка 6 визначає такий стан, при якому деформуються окремі частини роздробленого бетону.

При розрахунках такі діаграми будуються для певних значень високих температур і мають вигляд, який показаний на рис. 1.12. Означені діаграми для розрахунку можуть бути використані при їх представленні математичними залежностями. Вони можуть бути представлені без врахування спадної гілки у вигляді двухліїєних діаграм типу діаграм Прандтля [39, 40] або трьохліїєних діаграм із проміжною ділянкою. Більш складне їх представлення із врахуванням спадної гілки може бути у вигляді кусочно-ліїєних функцій [60], поліноміальних апроксимацій [48 – 56] та раціонально-дробних функціоналів [24, 38]. Зниження міцності бетону враховується при введенні спеціальних коефіцієнтів роботи.

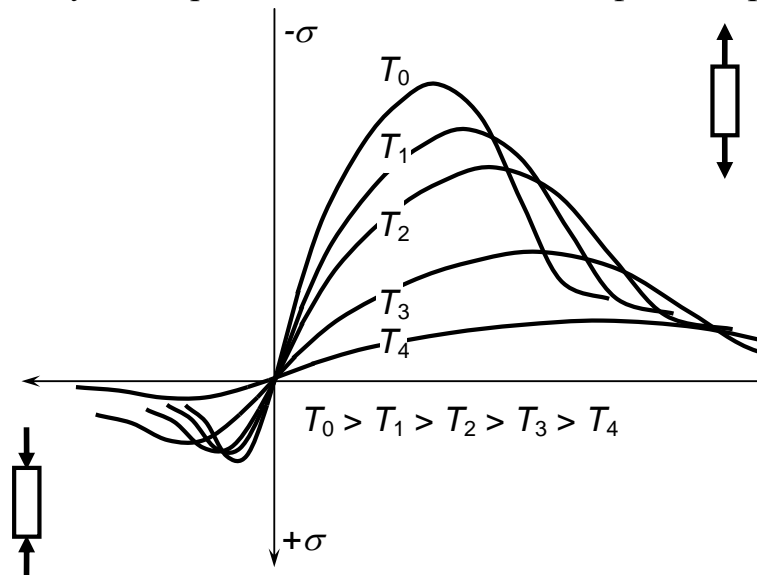


Рис. 1.12. Діаграми деформування бетону для різних температур.

У табл. 1.5 представлені математичні моделі, що визначають вигляд та характер діаграм деформування бетону.

Таблиця 1.5

Математичні моделі механічних властивостей бетону й арматури

№, п/п	Напруження у бетоні, МПа; граничні деформації бетону	Напруження в арматурі, МПа; граничні деформації арматурної сталі	Джерело
1.	при $0 < \epsilon_b < \epsilon_{b1}$, $\sigma_b = E_{b,red,r}\epsilon_b$, при $\epsilon_{b1} < \epsilon_b < \epsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T}$ (стискання), $\sigma_b = R_{bt,T}$ (розтяг)	при $0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T}\epsilon_s$; $\epsilon_{s0} = R_{s,T}/E_{s,T}$ при $\epsilon_{s0} < \epsilon_s \leq \epsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}$; $\epsilon_{s2} = k_\epsilon \epsilon_{s0}$.	[39]
2.	при $0 < \epsilon_b \leq \epsilon_{cl,T}$, $\sigma(\epsilon) = \frac{3\epsilon_b R_{b,T}}{\epsilon_{cl,T} \left(2 + \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{cl,T}} \right)^3 \right)}$	при $0 < \epsilon_s < \epsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T}\epsilon_s$ при $\epsilon_{s0} < \epsilon_s \leq \epsilon_{sy}$ $\sigma_s = R_{sp,T} - c + (b/a)[a^2 - (\epsilon_{sy} - \epsilon_s)^2]^{0,5}$,	[38]

	<p>при $\varepsilon_{cl,T} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2}$,</p> $\sigma(\varepsilon) = R_{b,T} - \frac{R_{b,T}(\varepsilon_b - \varepsilon_{cl,T})}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{cl,T}},$	<p>при $\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st}$ $\sigma_s = R_{s,T}$,</p> <p>при $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$</p> $\sigma_s = R_{s,T} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st})/(\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})],$ <p>при $\varepsilon_{s2} < \varepsilon_s$ $\sigma_s = 0$,</p>	
3.	$\sigma(\varepsilon) = R_{b,T} \cdot \left(a_1 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^3 + a_4 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^4 + a_5 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^5 \right);$ <p>$\varepsilon_{bRT} = K_b \varepsilon_{bR}$; $R_{b,T} = \gamma_{bT} R_b$</p> $K_{bT} = 2 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,003 \cdot T + 0,9119;$ $\gamma_{bT} = -8 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,0006 \cdot T + 1,0213;$ $a_1 = 2,143; a_2 = -1,118; a_3 = -0,205;$ $a_4 = 0,217; a_5 = -0,023; \varepsilon_{bR} = 0,0018$	<p>Для арматури с фізичною межею текучості</p> <p>при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$;</p> $\varepsilon_{s0} = R_{s,T} / E_{s,T}$ <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}$;</p> $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}.$ <p>Для арматури с умовною межею текучості</p> <p>при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s1}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$;</p> $\varepsilon_{s1} = 0,8 R_{s,T} / E_{s,T}$ <p>при $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s2,T} \varepsilon_s$;</p> $\varepsilon_{s0} = R_{s,T} / E_{s2,T} + 0,002$ <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = E_{s3,T} \varepsilon_s$;</p> $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$	[56]
4.	<p>при $0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$ $\sigma_b = E_{b,T} \varepsilon_b$, $\varepsilon_{b1} = \frac{0,4 R_{b,T}}{E_{b,T}}$;</p> <p>при $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b0}$</p> $\sigma = \left(2,2 \cdot -1,4 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right)^3 \right) R_{b,T}$ $\varepsilon_{b0} = 0,002 \left(1 + 5 \left(\frac{T}{1000} \right)^{1,7} \right);$ <p>при $\varepsilon_{b0} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T} - \frac{R_{b,T} - p}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{b0}} \varepsilon_b$</p> <p>, $\varepsilon_{b2} = 1,6 \varepsilon_{b0}$</p> $p = \frac{(\varepsilon_b / \varepsilon_{b0}) R_{b,T}}{1,8((\varepsilon_b / \varepsilon_{b0}) - 1)^2 + (\varepsilon_b / \varepsilon_{b0})}.$	<p>при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$;</p> $\varepsilon_{s0} = R_{s,T} / E_{s,T}$ <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}$;</p> $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}.$	[24]

5.	<p>при $0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$ $\sigma_b = E_{b,T} \varepsilon_b$, $\varepsilon_{b1} = 0,6 \frac{R_{b,T}}{E_{b,T}}$,</p> <p>при $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b0}$ $\sigma_b = 0,6R_{b,T} + \frac{R_{b,T}(1-0,6)}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} \varepsilon_b$,</p> <p>$\varepsilon_{b0}$ – табл. значення при $\varepsilon_{b0} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T}$, ε_{b2} $= 1,7\varepsilon_{b0}$</p>	<p>Для арматури с фізичною межею текучості при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s0} = R_{s,T}/E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$.</p> <p>Для арматури с умовною межею текучості при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s1}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s1} = 0,8R_{s,T}/E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s2,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s0} = R_{s,T}/E_{s2,T} + 0,002$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = E_{s3,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$</p>	[40]
----	--	---	------

При великій різниці міцності на допустимих деформаціях при стисканні та розтязі, як правило, у розрахунок закладається тільки опір бетону при стисканні, оскільки вважається, що розтягуючі зусилля сприймаються арматурними включеннями. Тим не менше, стандартними методиками [38] передбачається використання гілки діаграми деформування бетону, що відповідає за розтяг.

Для врахування опору арматурної сталі також використовуються діаграми із спадною гілкою. У табл. 1.5 також подані математичні моделі, що визначають вигляд та характер діаграм деформування арматурної сталі.

Найбільш простим методом визначення меж вогнестійкості залізобетонних колон є метод аналогій. Великий обсяг даних щодо меж вогнестійкості колон із різними параметрами, отриманий експериментальним, або розрахунковим шляхом, узагальнюється у вигляді таблиць, або номограм. Використовуючи певну частину початкових даних, наприклад, геометричну конфігурацію перерізу, величину захисного шару, діючі навантаження, клас міцності бетону й арматурної сталі у відповідній таблиці вибирається гарантована фактична межа вогнестійкості. В якості прикладу нижче подана табл. 1.6, що повністю відповідає одній з довідникових таблиць згідно з рекомендаціями стандартів [38].

В даній таблиці параметри b_{min} , a – відповідно мінімальний розмір перерізу і товщина захисного шару, ω – ступінь армування, n – рівень навантаження колони. Величина ступеня армування визначається за формулою:

$$\omega = \frac{A_s R_s}{A_b R_b}, \quad (1.15)$$

де A_s , A_b – частини площі поперечного перерізу колони, відповідні арматурним включенням і бетону;

R_s , R_b – відповідно міцності арматурної сталі і бетону.

Таблиця 1.6

Мінімальні розміри колони та відстаней від осі поздовжньої арматури до найближчої обігрівної поверхні для залізобетонних колон з прямокутним або круглим перерізом

Стандартна вогнестійкість	Ступінь армування, ω	Мінімальні розміри (мм). Ширина колони/осьова відстань робочої арматури, b_{min}/a			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
		3	4	5	6
R30	0,100	150/25*	150/25*	200/30:250/ 25*	300/30:350/ 25*
	0,500	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:250/ 25*
	1,000	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:300/ 25*
R60	0,100	150/25:20 0/25*	200/40:300/ 25*	300/40:500/ 25*	500/25*
	0,500	150/25*	150/35:200/ 25*	200/35:350/ 25*	350/40:500/ 25
	1,000	150/25*	150/30:200/ 25*	200/40:400/ 25*	300/50:600/ 30
R90	0,100	200/40:20 0/25*	300/40:400/ 25*	500/50:550/ 25*	550/40:600/ 25*
	0,500	150/35:20 0/25*	200/45:300/ 25*	300/45:550/ 25*	500/50:600/ 40
	1,000	200/25*	200/40:300/ 25*	250/40:550/ 25*	500/50:600/ 45
R120	0,100	250/50:35 0/25*	400/40:550/ 25*	550/25*	550/60:600/ 45
	0,500	200/45:30 0/25*	300/45:550/ 25*	450/45:600/ 25*	500/60:600/ 50
	1,000	200/40:25 0/25*	250/50:400/ 25*	450/45:600/ 30	600/60
R180	0,100	400/50:50 0/25*	500/60:550/ 25*	550/60:600/ 30	(1)
	0,500	300/45:45 0/25*	450/45:600/ 25*	500/60:600/ 50	600/75
	1,000	0/25*	0/25*	0/25*	(1)

		300/35:40 0/25*	450/50:550/ 25*	500/60:600/ 45	
R240	0,100	500/60:55 0/25*	550/40:600/ 25*	600/75	(1)
	0,500	450/45:50 0/25*	550/55:600/ 25*	600/70	(1)
	1,000	400/45:50 0/25*	500/40:600/ 30	600/60	(1)
		*) Зазвичай потрібно контролювати захисний шар, що зазначений в [38] (1) Вимагається ширина більша за 600 мм. Необхідна окрема оцінка для згину.			

Рівень навантаження визначається за формулою:

$$n = N_{0Ed,fi} / (0,7(A_b R_b + A_s R_s)), \quad (1.16)$$

де $N_{0Ed,fi}$ – розрахункове навантаження що діє на колону при дії пожежі.

Розрахункове навантаження визначається за формулою:

$$N_{0Ed,fi} = 0,7 N_{0Ed}, \quad (1.17)$$

де N_{0Ed} – розрахункова поздовжня сила що діє на колону згідно з розрахунковою схемою при діючих сполученнях навантажень.

Хоча для більшості застосовних колон у будівлі можна застосувати описаний метод, однак, на його використання існує ряд обмежень. Цей метод можна застосовувати коли поздовжній згин колони є незначним. Параметрам, що характеризують такий вплив є ексцентриситет навантаження та гнучкість колони.

Для більш точної оцінки меж вогнестійкості залізобетонних колон використовується метод ізотерми 500 °С [38]. Даний метод розділяє переріз колони на зовнішню область, що нагріта до температури вище за 500 °С, і внутрішню, нагріту нижче за означену температуру. Перша область вважається такою що не бере участь у здійсненні опору діючим навантаженням, а друга такою, що зберігає свої міцнісні та деформативні властивості на рівні ненагрітих шарів. Тому розрахунок колони 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.

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

Поперечний переріз ділиться на декілька ($n \geq 3$) паралельних зон однакової товщини (прямокутні елементи), 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 обігріваємих поверхонь. Приведення поперечного перерізу базується на визначенні товщині a_z пошкодженої зони обігріваної поверхні (див. рис. 1.13).

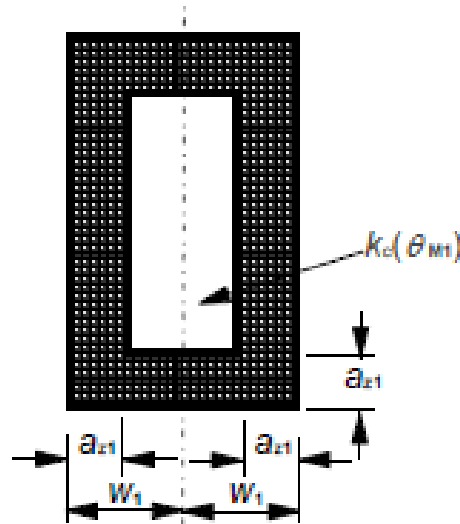


Рис. 1.13. Зниження міцності та приведення поперечного перерізу для колони під вогневим впливом.

Товщина пошкодженої зони визначається за формулою:

$$a_{z1} = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right]. \quad (1.18)$$

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.

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

Більш точними є методи засновані на деформаційних моделях [39, 40]. Метод розуміє застосування характеристики, що визначає ресурс залізобетонної колони у поточний момент часу і називається «несучою здатністю». У випадку колони це максимальна продольна сила, яку може витримати дана колона в цей момент часу під впливом пожежі. Дана сила

визначається як критична ейлерова сила при покроковому збільшенні кривизни колони. Дана схема ілюструється рис. 1.14.

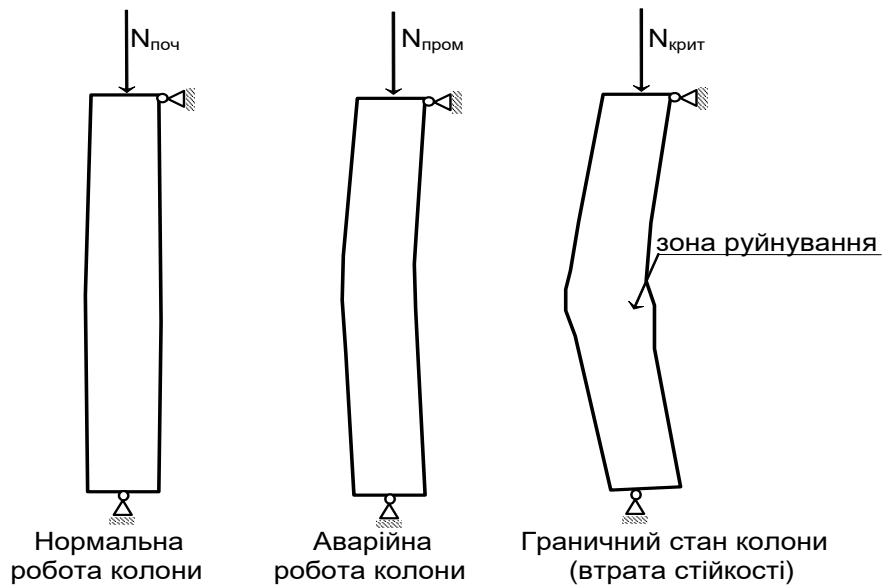


Рис. 1.14. Граничний стан при втраті стійкості залізобетонної колони.

Ознакою настання стану втрати стійкості є незмінність сили при збільшенні кривизни колони. Така ознака може бути зафіксована при побудованні графіку «зусилля – кривизна» подібного до рис. 1.15.



Рис. 1.15. Схема визначення критичної сили для залізобетонної колони у поточний момент часу дії пожежі.

Для визначення силових факторів для поточного значення кривизни застосовується деформаційна модель у вигляді:

$$\begin{cases} \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} Y_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} Y_{sj} = M_T \\ \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} = N_T \end{cases}, \quad (1.19)$$

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 бетонна і арматурної сталі визначаються з використанням тієї чи іншої моделі з табл. 1.5 як функції крайових деформацій та кривизни колони за виразами:

$$\sigma_{bi} = f_1(\varepsilon_{bi}), \sigma_{sj} = f_2(\varepsilon_{sj}), \varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{bi}, \varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{sj}, \quad (1.20)$$

де ε_0 – відносна деформація крайової точки перерізу у напрямку найменшого моменту інерції;

$1/r$ – кривизна колони.

Даний підхід дозволяє врахувати пластичні властивості матеріалів і не розглядає поточного напружено-деформованого стану колони. Це з одного боку є перевагою, оскільки за допомогою відносно простих обчислювальних алгоритмів дозволяє оцінити межу вогнестійкості і автоматизувати даний розрахунок, а з іншого боку є недоліком унаслідок відходу від прямої фізичної картини деформування пожежі під час пожежі до непрямого критерію «несуча здатність», який не може бути визначений з прямих спостережень і закладає відповідну похибку у розрахунок.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕМПРАТУРНОГО ПОЛЯ У ПЕРЕРІЗІ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОЛОНИ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ПОКАЗНИКАМИ У КОНТРОЛЬНИХ ТОЧКАХ

2.1. Апроксимація температурних розподілень за лініями розташування термопар у перерізах залізобетонних колон при дії пожежі

2.1.1. Експериментальні дані щодо температурних розподілів у перерізі залізобетонних колон при дії пожежі із стандартним температурним режимом

Для вивчення температурних даних у внутрішніх шарах залізобетонних колон можна використати результати вогневих випробувань. У роботах [9 – 12] наведений великий обсяг експериментальних даних щодо показників температур у контрольних точках перерізу залізобетонних колон при їх нагріванні за стандартним температурним режимом пожежі. При цьому у більшості випадків досліджувалися колони із квадратним перерізом. Схема розташування термопар при цьому має вигляд, що поданий на рис. 2.1.

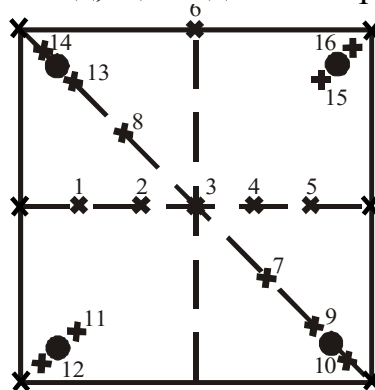


Рис. 2.1. Розташування термопар у перерізах залізобетонних колон (1 – 16 номери контрольних точок у перерізі).

У монографії [11] наведені результати вимірювань температур у внутрішніх шарах при випробуваннях колон квадратного перерізу 300×300, виготовлених з бетону різних типів. На рис. 2.2. подані розподілення температур по горизонтальній лінії вимірювання (див рис. 2.1).

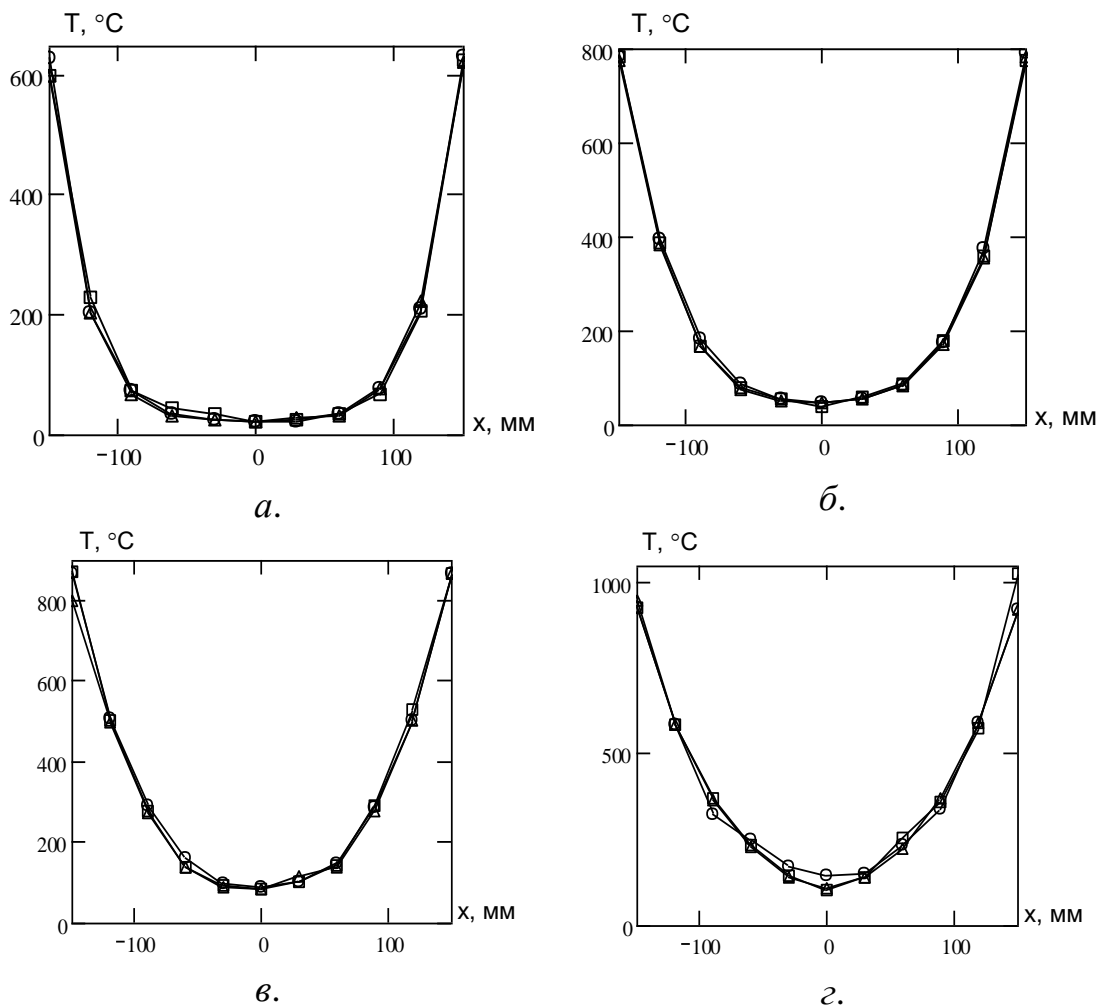


Рис. 2.2. Температурні розподіли по горизонтальній лінії розташування термопар у перерізах 3-х зразків залізобетонних колон 300×300 з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: *a* – на 30 хв; *б* – на 60 хв; *в* – на 90 хв; *г* – на 120 хв.

2.1.2. Апроксимація температурних розподілень у перерізі залізобетонних колон по лініям розташування термопар

Вигляд температурних розподілень, які подані на рис. 2.2 відповідає параболічним залежностям. Дані залежності пропонується апроксимувати за виразом, що має такий загальний вигляд:

$$T(i)|_{x \leq 0} = T_0 + (T_{max} - T_0) \left[\frac{i}{n} \right]^q, \quad (2.1)$$

де T_0 – мінімальна температура, °C;
 T_{max} – максимальна температура, °C;
 i – номер контрольної точки у просторі перерізу;
 n – кількість контрольних точок;

q – показник ступеня параболі.

Задача визначення апроксимуючого виразу типу (2.1) зводиться до підбирання оптимального показника ступеня параболі q шляхом мінімізації середньоквадратичної нев'язності:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m [T_{iM} - T_{iE}]^2 \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

де m – кількість просторово-часових контрольних точок;

T_{iE} , T_{iM} , - експериментальне та модельне значення температури в i -тій просторово-часовій контрольній точці.

Для розв'язку задачі пошуку оптимуму був використаний метод покрокового спуску. Блок-схема алгоритму подана на рис 2.3.

Після проведення розрахунків були знайдені апроксимуючі залежності за якими побудовані графіки температурних розподілень, які подані на рис. 2.4. Графіки на рис. 2.4. показують, що отримані результати є дуже близькими до залежностей, які були отримані експериментальним шляхом.

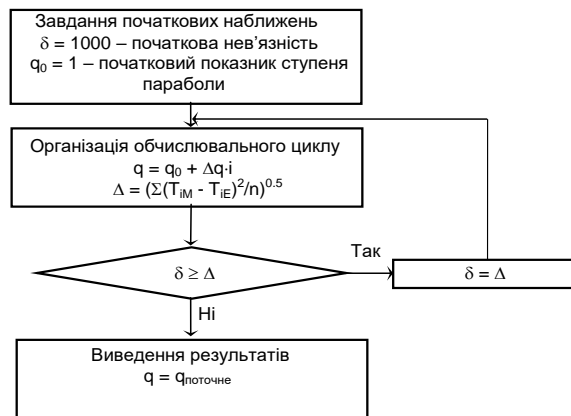


Рис. 2.3. Блок-схема алгоритму визначення апроксимуючого поліному.

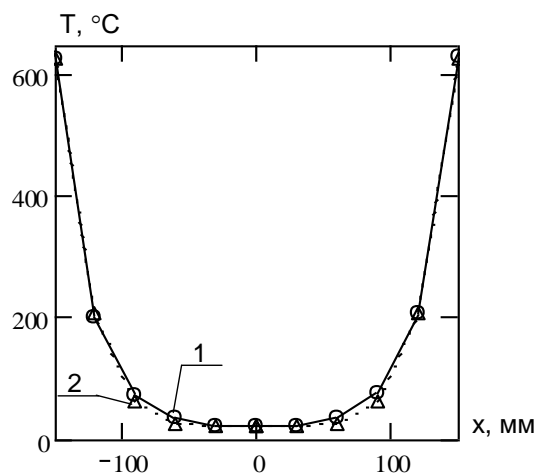


Рис. 2.4. Результати апроксимації температурного розподілення для моменту часу 30 хв дії «стандартної» пожежі: 1 – експериментальні дані; 2 – результати апроксимації.

2.1.3. Адекватність результатів апроксимації

Адекватність отриманих даних визначалася за декількома критеріями. За рекомендаціями в роботах [99, 100] в якості критеріїв адекватності пропонується використовувати абсолютне та відносне відхилення, а також F-критерій (критерій Фішера), який визначається за формулою:

$$F_c = \frac{S_{ad}^2}{S_{cp}^2} \leq F(v_1, v_2, \alpha), \quad (2.3)$$

де S_{ad}^2 - дисперсія адекватності,

S_{cp}^2 - дисперсія відтворюваності експериментальних даних,

$v_1 = n - 1$ - 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:

$$S_{ad}^2 = \frac{d}{n-1} \sum_{k=1}^n \left[\frac{\bar{y}_k^e - y_k}{\min(|\bar{y}_k^e|, |y_k|)} \right]^2, \quad (2.4)$$

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

y_k - поточне розрахункове значення.

Дисперсія відтворюваності експериментальних даних визначається за формулою:

$$S_{cp}^2 = \frac{1}{d(n-1)} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^d \left[\frac{y_{kj}^e - \bar{y}_k^e - \delta_{вим}}{\bar{y}_k^e} \right]^2. \quad (2.5)$$

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

$\delta_{вим}$ = допустима похибка вимірювання згідно з [100]

В табл. 2.1 и табл. 2.2 подані результати розрахунків за описаною методикою.

Таблиця 2.1

Статистичні параметри при дослідженні адекватності результатів апроксимації температурних розподілів у залізобетонній колоні з важкого бетону на гранітному заповнювачі

Час експонування, хві	Число ступенів вільності чисельника, ν_1	Число ступенів вільності знаменника, ν_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{в}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. [100].	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, ° C
30	10	30	3	11	0,176	0,055	0,313	2,15	5,3	11,51
60	10	30	3	11	0,036	0,065	1,784	2,15	6,2	9,98
90	10	30	3	11	0,012	0,007	0,589	2,15	2,1	10,41
120	10	30	3	11	0,009	0,017	1,889	2,15	5,8	12,49

Таблиця 2.2

Статистичні параметри при дослідженні адекватності результатів апроксимації температурних розподілів у залізобетонній колоні з високоміцного бетону на гранітному заповнювачі

Час експонування, хві	Число ступенів вільності чисельника, ν_1	Число ступенів вільності знаменника, ν_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{в}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. [100].	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, ° C
30	10	20	2	11	0,172	0,081	0,472	2,31	6,8	6,4
60	10	20	2	11	0,169	0,049	0,293	2,31	1,0	7,5
90	10	20	2	11	0,193	0,039	0,203	2,31	4,0	13,07
120	10	20	2	11	0,195	0,023	0,118	2,31	0,7	9,89

На рис 2.5 подані результати апроксимації відповідних температурних розподілень з усередненою експериментальною залежністю разом з похибкою експериментальних даних.

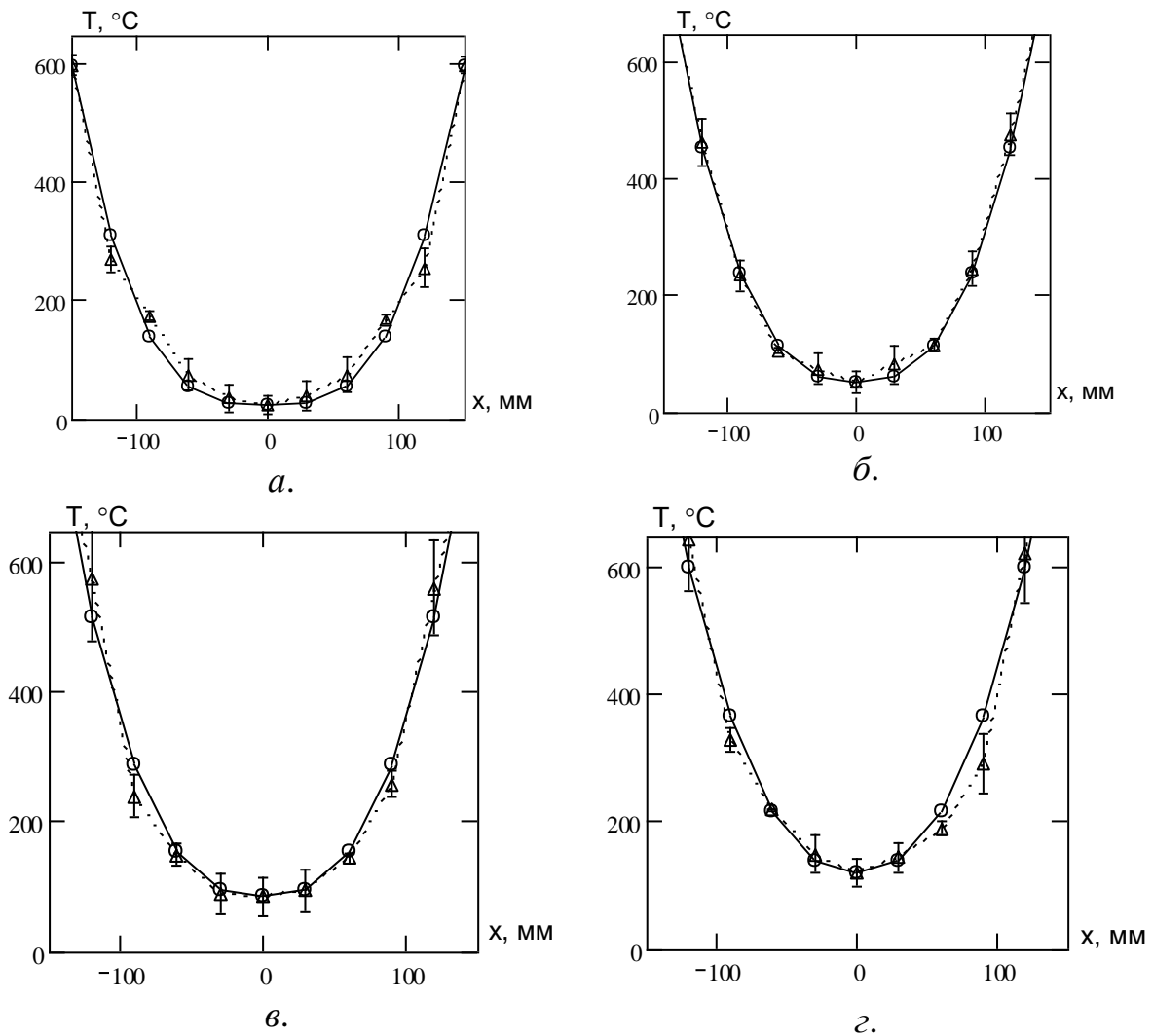


Рис. 2.5. Температурні розподіли по горизонтальній лінії розташування термопар у перерізах 3-х зразків залізобетонних колон 300×300 з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: *a* – на 30 хв; *б* – на 60 хв; *в* – на 90 хв; *г* – на 120 хв.

Аналіз даних табл. 2.1 і табл. 2.2 показує, що запропонований спосіб апроксимації експериментальних даних дозволяє отримувати адекватні дані, оскільки у всіх випадків F-критерій адекватності має істотно нижчі значення за табличні. Похибка при цьому складає не більше за 6% і у середньому становить 3,9 %. Середньоквадратичне відхилення даних апроксимації від усереднених даних за всіма виборками складає не більше 13 °C. Це означає, що запропонований метод апроксимації є достатньо точним.

Аналіз даних на рис. 2.5 показує, що в більшості випадків дані, які отримані у результаті апроксимації за запропонованим методом вписуються у експериментальну похибку, що показує їх високу точність та імовірність.

2.2. Інтерполяція температурних розподілів по всьому перерізу залізобетонних колон за температурами ліній розташування термопар

Аналіз наявних робіт з експериментальними даними щодо вогневих випробувань [9 – 11, 56, 102, 103, 106] показує, що поверхні розподілів температур по перерізу будуються схематично і не містять точних даних температур, оскільки це здійснити експериментальним шляхом дуже важко. Тому вивчення поверхонь розподілу температур було здійснено за допомогою розв'язку задачі нестационарної теплопровідності за рівняннями (1.5) – (1.8), (1.10). Теплофізичні властивості бетону взяті згідно з рекомендаціями [38], які подані на рис. 1.8 та рис. 1.9. На рис. 2.6 подана розрахункова схема залізобетонної колони 300×300 із чотирьох стороннім нагрівом за стандартною температурною кривою пожежі.

Модель теплопровідності може бути описана двовимірним нестационарним рівнянням теплопровідності [41, 45, 60, 82, 84]:

$$Cv(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (2.6)$$

з граничними умовами III роду (1.10). Граничні умови III роду враховують теплообмін, обумовлений конвекцією і випромінюванням, при використуванні формул (1.8) і (1.10) [41, 45, 60].

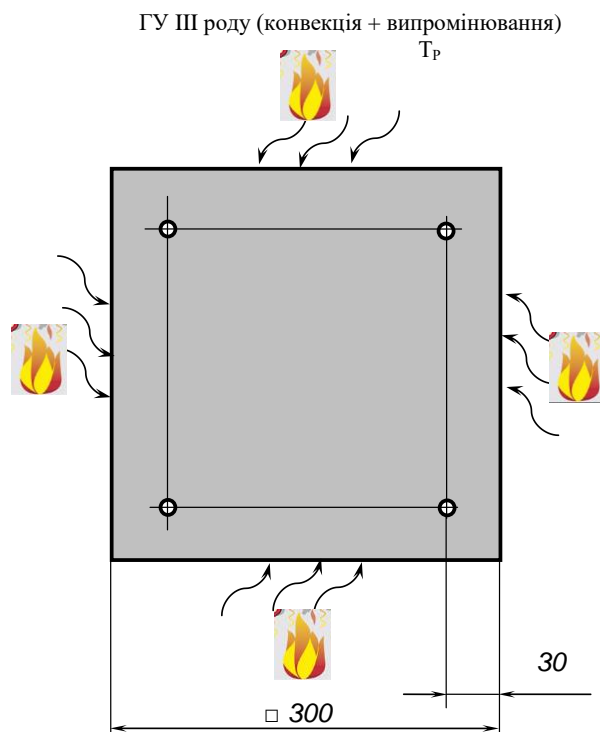


Рис. 2.6. Розрахункова схема для моделювання температурних розподілів у залізобетонній колоні при її нагріванні за стандартним температурним режимом пожежі.

Рівняння (2.6) може бути вирішено для даного випадку тільки чисельними методами [74 – 80, 92 – 95]. Одним з найефективніших є метод кінцевих різниць [74 – 80, 92 – 95]. Даний метод апроксимує відповідні похідні кінцевими різницями температур (потенціалів) у відповідних вузлових точках. У разі квазілінійного рівняння теплопровідності для врахування не лінійності коефіцієнтів застосовується інтегро-інтерполяційний метод [92–95].

Для апроксимації лівої частини рівняння теплопровідності з точністю $0(h^2 + \Delta t)$ скористаємося приблизною рівністю вигляду [88, 89]:

$$A_{i,k} = C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = C_v \left(\frac{T_{i,k} + T_{i,k+1}}{2} \right) \cdot \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta t}. \quad (2.7)$$

Права частина рівняння (2.6) з точністю $0(h^2 + \Delta t)$ апроксимується за явною адитивною схемою [88, 89]:

$$\begin{aligned} B_{i,k} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = a_x T_{i-1,k}^x - (a_x + b_x) T_{i,k}^x + b_x T_{i+1,k}^x, \\ C_{i,k} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = a_y T_{i-1,k}^y - (a_y + b_y) T_{i,k}^y + b_y T_{i+1,k}^y, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де коефіцієнти при температурах визначаються з використанням інтегро-інтерполяційного методу [88, 89]:

$$\frac{1}{a} = h \int_0^{\Delta h} \frac{dh}{\lambda(T)} = \frac{(\lambda(T_{i-1}) + \lambda(T_i))h^2}{\lambda(T_{i-1})\lambda(T_i)}, \quad \frac{1}{b} = h \int_0^{\Delta h} \frac{dh}{\lambda(T)} = \frac{(\lambda(T_{i+1}) + \lambda(T_i))h^2}{\lambda(T_{i+1})\lambda(T_i)}. \quad (2.9)$$

При використанні виразів (2.6) – (2.9) формується рекурентна формула для обчислення температури в i -тій вузловій точці для $k+1$ -го часового шару за даними k -того часового шару. Рекурентна формула записується в неявному вигляді і тому на кожному етапі розв'язується як нелінійне рівняння.

Коефіцієнт теплопровідності бетону записуються у вигляді, рекомендованому в [38]:

$$\lambda = 2 - 0,2451 \frac{T}{100} + 0,0107 \left(\frac{T}{100} \right)^2, \quad (2.10)$$

Питома об'ємна теплоємність у вигляді

$$\begin{aligned}
C_v &= \rho(T) \cdot 900 \text{ при } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}, \\
C_v &= \rho(T)(900 + (T - 100)) \text{ при } 100^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C}, \\
C_v &= \rho(T)(1000 + 0,5(T - 100)) \text{ при } 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C}, \\
C_v &= \rho(T) \cdot 1100 \text{ при } 400^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

Для розрахунку температурних полів в перерізі колони методом кінцевих різниць даний переріз дискретизований як показано на рис. 2.7. При реалізації розрахунку достатньо розглянути 1/8 частину перерізу.

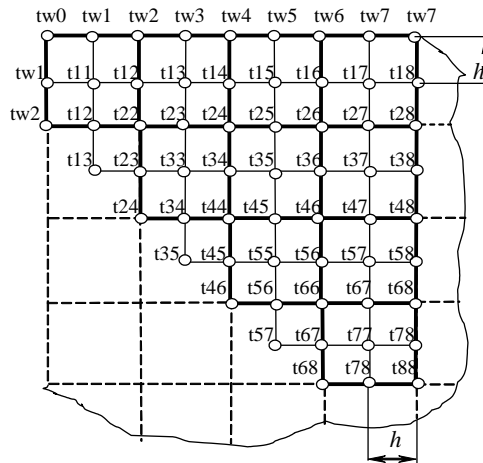


Рис. 2.7. Схема дискретизації 1/8 перетину залізобетонної колони при її всесторонньому обігріві.

Вид формул (2.7) – (2.11) зумовлює те, що на кожному часовому шарі необхідно вирішувати комплекс неявних рекурентних формул у вигляді рівнянь вигляду:

$$A_{i,k} = B_{i,k} + C_{i,k} . \tag{2.12}$$

Для їх вирішення застосовувався відомий метод половинного ділення, реалізований за алгоритмом, запропонованим в [88, 89] при обмеженнях, накладених на одержувані корені діапазоном можливих температур нагріву зразків.

ГУ III роду апроксимовані кінцевими різницями з точністю $O(h^2 + \Delta t)$ у вигляді [88]:

$$\frac{\lambda(T_{w_k})\lambda(T_{1,k})}{\lambda(T_{w_k}) + \lambda(T_{1,k})} \cdot \frac{T_{w_k} - T_{1,k}}{h} + \frac{h \cdot C_v(T_{1,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (T_{1,k} - T_{1,k-1}) = \alpha_k (T_{1,k} - T_{p,k}) \tag{2.13}$$

де T_p – температура пожежі, що відповідає стандартному температурному режимові і визначається за формулою (1.1);

α – коефіцієнт теплообміну, визначуваний формулами (1.11) – (1.16);

$h = 0.025$ м – крок розбиття перерізу;

$\Delta t = 60$ с – часовий крок.

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

Після проведення розрахунків були отримані температурні розподіли, які показані на рис. 2.8. Аналіз отриманих температурних розподілень показав, що поверхні, утворені ними є фігурами, які мають вигляд параболоїдів.

Згідно з виглядом отриманих температурних розподілень їх інтерполяцію пропонується здійснювати за трьома способами. Інтерполяцію за першим способом пропонується проводити за апроксимацією ліній, утворених фронтальними перерізами, параболічними залежностями типу (2.1). За другим способом інтерполяція здійснюється за апроксимацією твірних поверхні температурного розподілу параболічними залежностями типу (2.1). Третій спосіб полягає у апроксимації ліній ізотерм афінними кривими і їх побудуванні у кожній точці дискретизованого перерізу. За положенням ізотерми визначається температура вузлової точки. Після проведення інтерполяції за цими способами був визначений найбільш ефективний спосіб за адекватністю отриманих результатів.

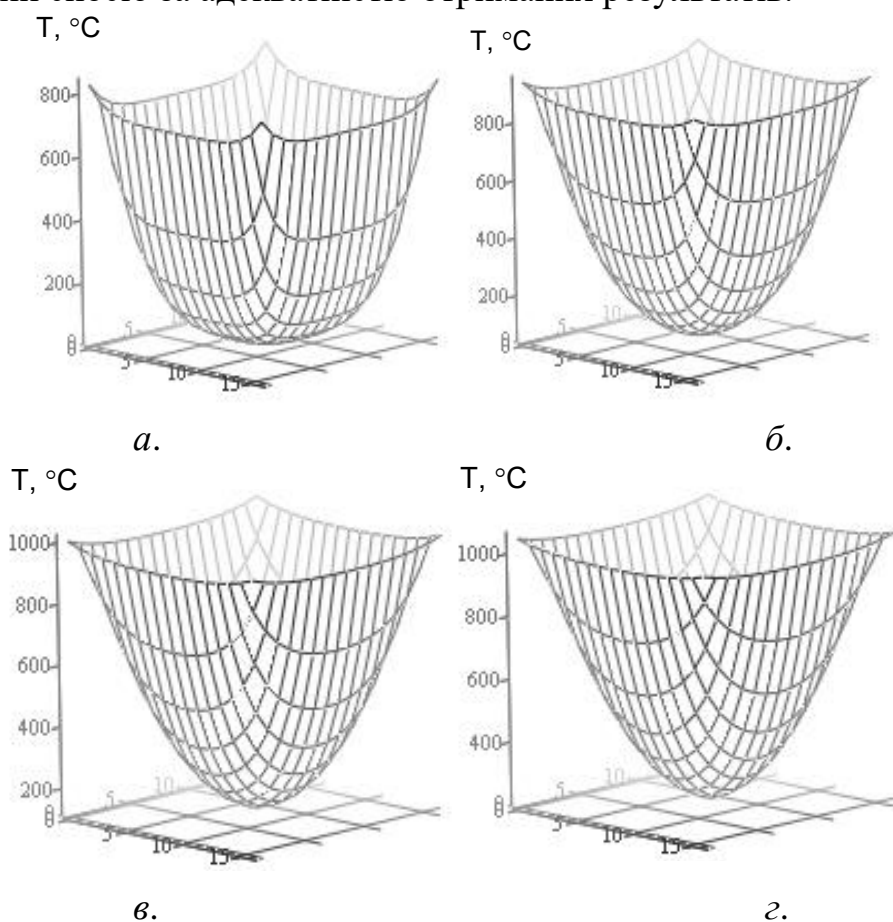


Рис. 2.8. Розрахункові температурні розподіли у перерізі залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: *а* – на 30 хв; *б* – на 60 хв; *в* – на 90 хв; *г* – на 120 хв.

2.2.1. Інтерполяція температурного поля в перерізі колони за фронтальними січними площинами

При проведенні інтерполяції за фронтальними січними площинами поверхні, що утворена температурним полем допускається, що лінія перетину січної площини та поверхні поля є також параболою, як показано на рис. 2.9.

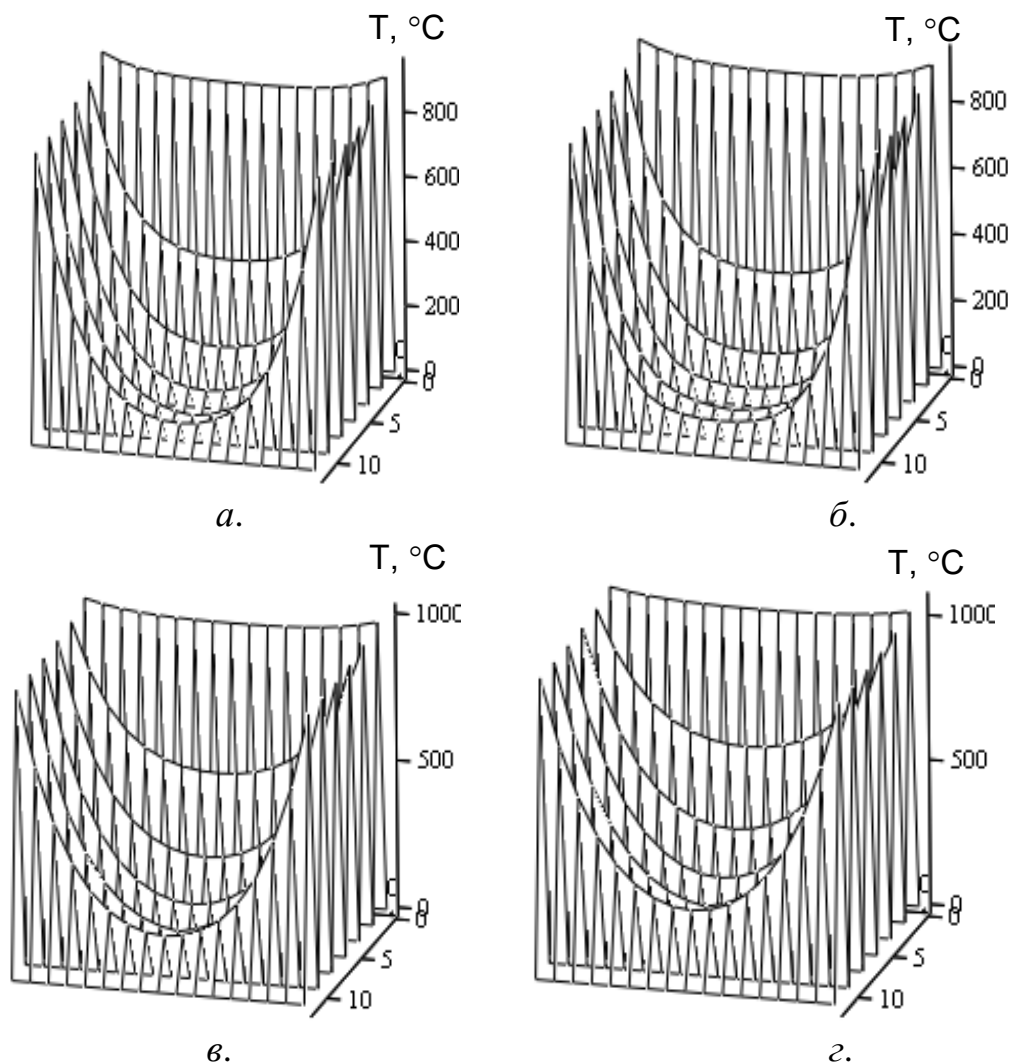


Рис. 2.9. Вигляд фронтальних січних площин температурних розподілів у перерізі залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: *а* – на 30 хв; *б* – на 60 хв; *в* – на 90 хв; *г* – на 120 хв.

Інтерполяція проводиться з використанням таких формул:

$$Tg_{k,i,j} = T0_k + (Tg \max_k - T0_k) \left[\frac{j}{n} \right]^{Qg_k} \quad \text{при } i = 0, j \neq 0; \quad (2.14)$$

$$Tv_{k,i,j} = T0_k + (Tv \max_k - T0_k) \left[\frac{i}{n} \right]^{Qv_k} \quad \text{при } i \neq 0, j = 0;$$

$$Td_{k,i,j} = T0_k + (Td \max_k - T0_k) \left[\frac{i}{n} \right]^{Qd_k} \quad \text{при } k = j \neq 0;$$

$$Tt1_{k,i,j} = Tg_{k,j} + (Tsg_{k,j} - Tg_{k,j}) \left[\frac{i}{n} \right]^{Qtg_{k,j}} \quad \text{при } i \neq 0, j \neq 0;$$

$$Tt2_{k,i,j} = Tv_{k,i} + (Tsv_{k,i} - Tv_{k,i}) \left[\frac{j}{n} \right]^{Qtv_{k,i}} \quad \text{при } j \neq 0, i \neq 0,$$

де Tg, Tv, Td – температури головної діагоналі, перших стовпчика та строки матриці температурного поля;

$T0$ – перша точка нульової строки та нульового стовпчика;

$Tt1, Tt2$ – температури що визначаються окремо для стовпчиків і окремо для строк матриці температурного поля;

Qg, Qv, Qd – показники ступеня параболи, що визначаються за алгоритмом, поданим на рис. 2.3;

Qtg, Qtv – показники ступеня параболи, що відповідно апроксимує поверхню за стовпчиками та строками окремо, які визначаються для кожного стовпчика або строчки за алгоритмом, що поданий на рис. 2.3.

Після по строкового та постовбчикowego складання двох окремих матриць температур обчислюється середнє значення для кожної вузлової точки і будується матриця температурного розподілу у кінцевому вигляді.

У результаті проведених розрахунків за розробленим алгоритмом були побудовані температурні розподіли для залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону на гранітному заповнювачі, використовуючи в якості початкових даних результати розрахунку, що подані на рис. 2.8. При цьому врахована дискретність контрольних точок вимірювання згідно із схемою, яка подібна до схеми, наведеної на рис. 2.1.

2.2.2. Інтерполяція температурного поля в перерізі колони за твірними

Інший підхід полягає у побудуванні відповідних інтерполяційних кривих у вигляді парабол у кожній вузловій точці у радіальній площині, яка проведена від нульової серединної точки перерізу до поверхні колони, тобто до границі перерізу. При цьому показник ступеня параболи інтерполюється за його залежністю від тангенса кута нахилу площини до профільної площини поверхні температурного розподілення. На рис. 2.10 показана схема проведення інтерполяції.

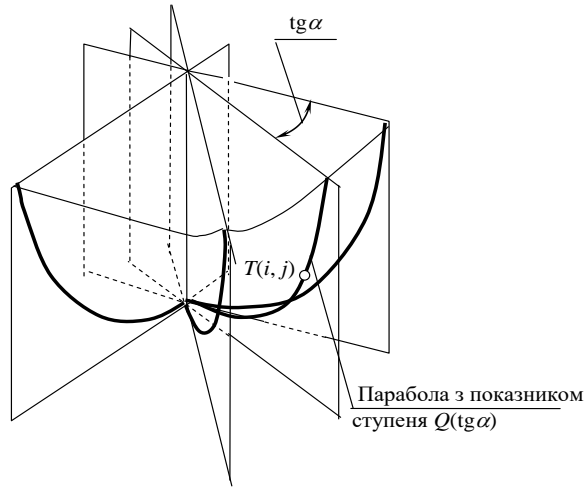


Рис. 2.10. Схема інтерполяції розподілів температур за другим способом.

Для реалізації описаного підходу використовуються три перші формули групи виразів (2.14), що доповнюються такими формулами

$$\begin{aligned}
 Q_{tg_{k,i,j}} &= Q_{g_k} + (Q_{d_k} - Q_{g_k}) \left[\frac{i}{j} \right]^{1,7}, & T_{gt_{k,i,j}} &= T_{0_k} + (T_{g \max_k} - T_{0_k}) \left[\frac{i}{j} \right]^{Q_{g_k}}, \\
 Tt1_{k,i,j} &= T_{gt_{k,i,j}} + (T_{0_k} - T_{gt_{k,i,j}}) \left[\frac{i}{n} \right]^{Q_{tg_{k,i,j}}} && \text{при } i \neq 0, j \neq 0, i - j > 0; \\
 Q_{tv_{k,i,j}} &= Q_{v_k} + (Q_{d_k} - Q_{v_k}) \left[\frac{j}{i} \right]^{1,7}, & T_{vt_{k,i,j}} &= T_{0_k} + (T_{v \max_k} - T_{0_k}) \left[\frac{j}{i} \right]^{Q_{v_k}}, \\
 Tt2_{k,i,j} &= T_{vt_{k,i,j}} + (T_{0_k} - T_{vt_{k,i,j}}) \left[\frac{j}{n} \right]^{Q_{tv_{k,i,j}}} && \text{при } i \neq 0, j \neq 0, i - j < 0;
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

2.2.3. Інтерполяція температурного поля в перерізі колони за наближенням ізотерм

Ще один підхід полягає у наближенні сімейства кривих-ізотерм у перерізі залізобетонної колони при її нагріванні при пожежі. При цьому апроксимуючі функції можна записати у такому загальному вигляді:

$$y(x) = q \left(1 - \left(\frac{x}{q} \right)^p \right)^{1/p} \tag{2.16}$$

де p і q – коефіцієнти, які підлягають визначенню при наближенні поверхні розподілення температур. На рис. 2.11 показаний вигляд сімейства кривих, побудованих за виразом (2.16).

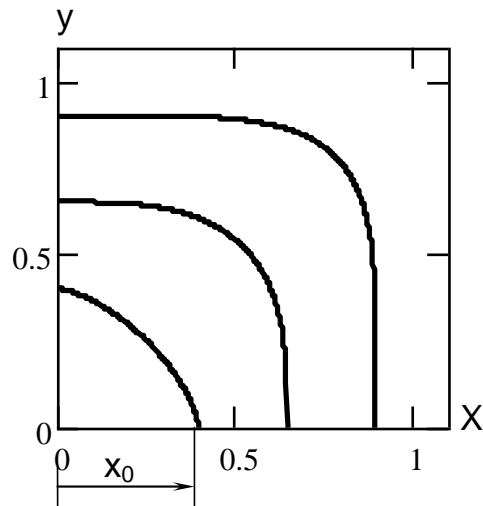


Рис. 2.11. Залежності, що апроксимують ізотерми у перерізі колон

Записуючи вираз (2.16) у параметризованому вигляді, було записане рівняння:

$$y = x_0 \left(1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^{p_0 - (p_{\max} - p_0)x_0^n} \right)^{\frac{1}{p_0 - (p_{\max} - p_0)x_0^n}}, \quad (2.17)$$

де $p_0 = 1,5$, $p_{\max} = 15$ – мінімальний та максимальний показники ступеня функції, що апроксимує ізотерми;

x_0 – початкове значення координати x функції, що апроксимує ізотерми;

n – параметр, який піддається оптимізації.

Побудування ізотерм відбувається у такій послідовності.

1. Визначаються параметри виразів (2.14) для значень температур головних вертикалі, горизонталі та діагоналі відповідної матриці за алгоритмом, який поданий на рис. 2.3.

2. На кожній ітерації вираз (2.17) вирішується як рівняння відносно параметра x_0 для поточного параметра n .

3. За отриманими значеннями поточних параметрів x_0 і n визначаються температури точок діагоналі з використанням виразів (2.14).

4. Варіюючи параметр n , мінімізується середньоквадратична нев'язність і знаходиться його оптимальне значення у кожний контрольний момент часу з використанням алгоритму, який відповідає блок-схемі на рис. 2.3.

5. Вирішуючи вираз (2.17) як рівняння на кожному контрольному моменті часу для кожної вузлової точки і застосовуючи вирази (2.14), визначається розподілення температур.

Рівняння (2.17) вирішується методом ітерацій.

2.2.4. Результати інтерполяції температурних розподілів

На рис. рис. 2.12 – 2.14 подані температурні розподілення досліджуваної колони, які були отримані за трьома описаними методами інтерполяції.

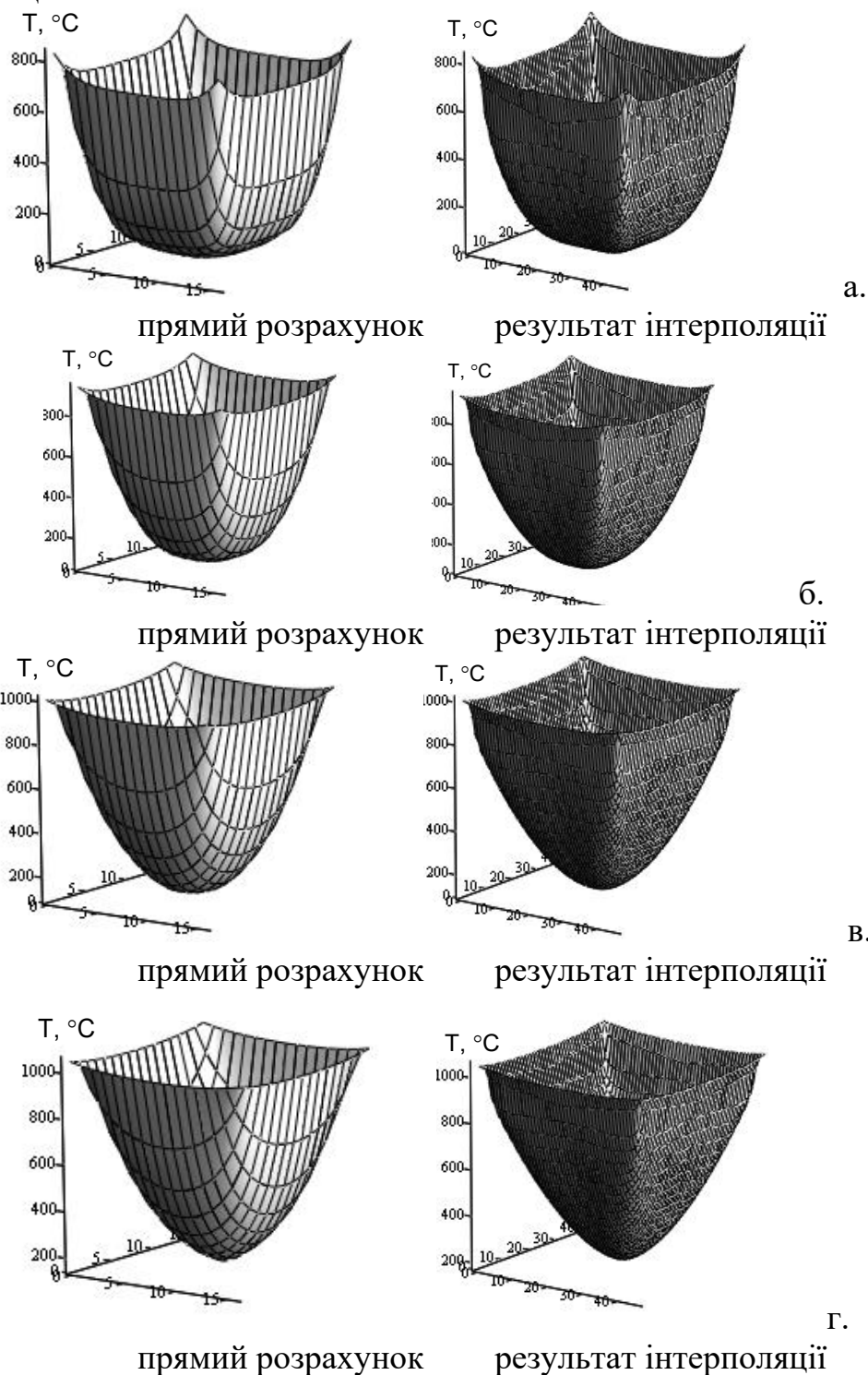


Рис. 2.12. Температурні розподіли у перерізі залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, визначені за першим методом інтерполяції: а – на 30 хв; б – на 60 хв; в – на 90 хв; г – на 120 хв.

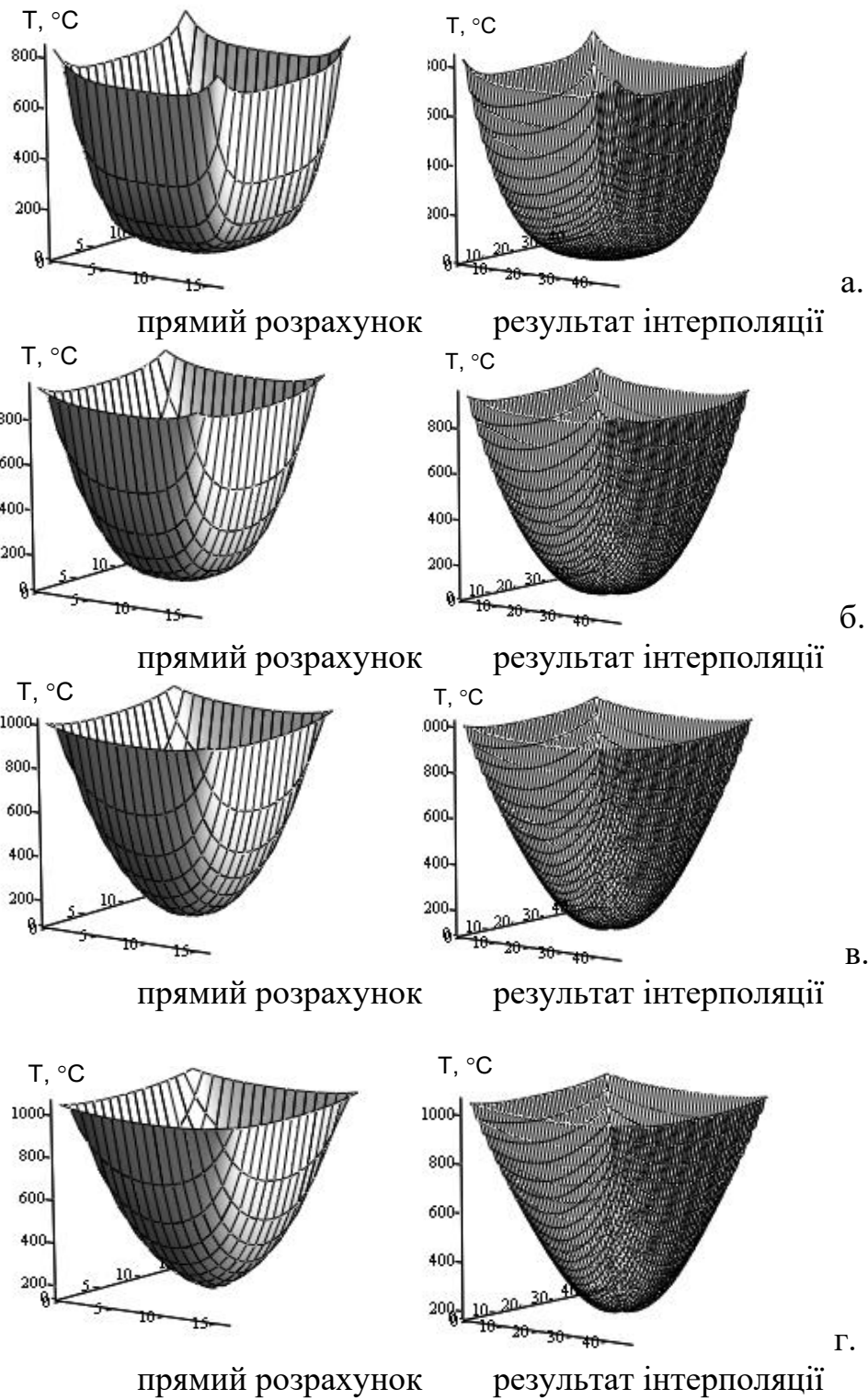


Рис. 2.13. Температурні розподіли у перерізі залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, визначені за другим методом інтерполяції: *а* – на 30 хв; *б* – на 60 хв; *в* – на 90 хв; *г* – на 120 хв.

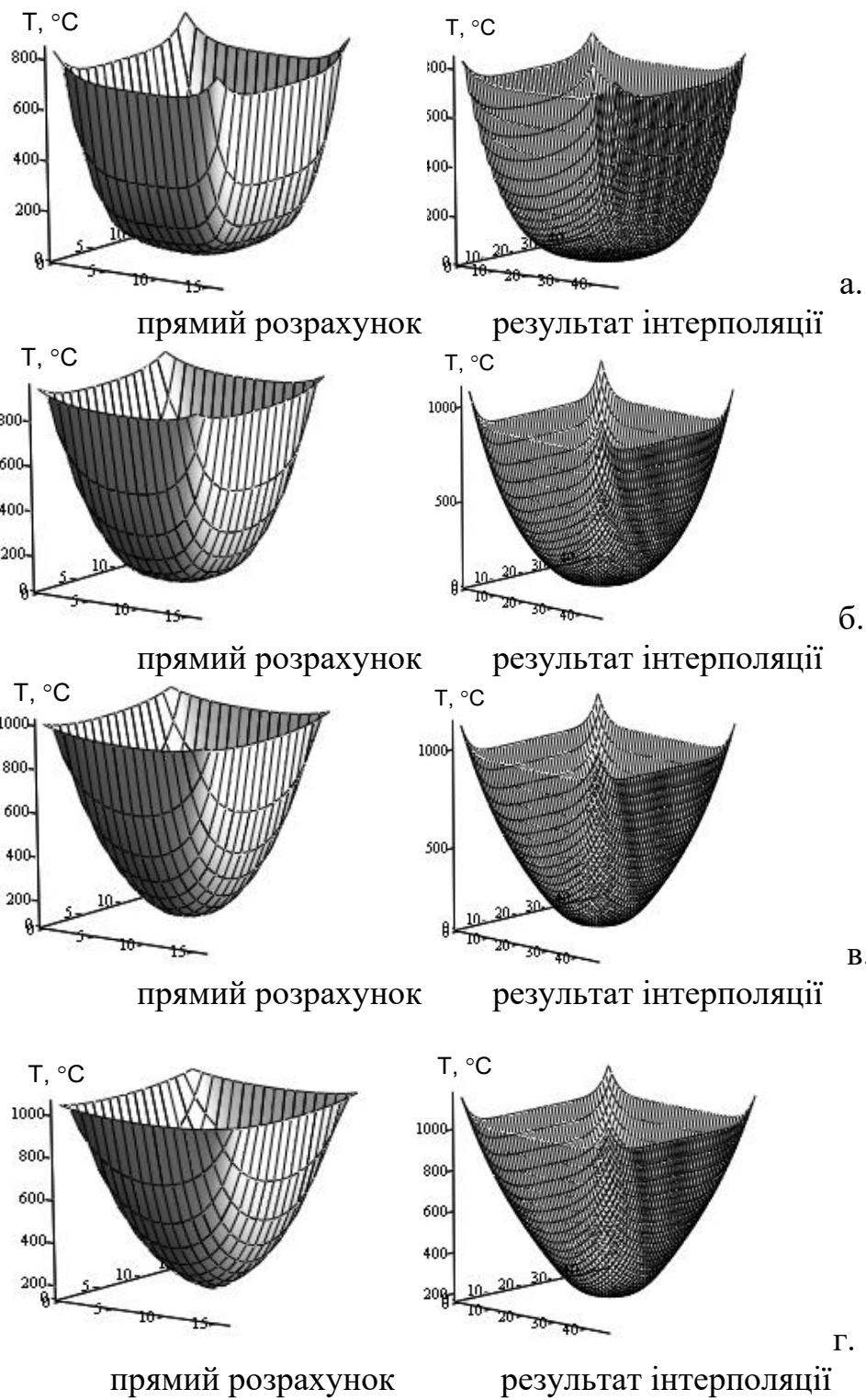


Рис. 2.14. Температурні розподіли у перерізі залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, визначені за другим методом інтерполяції: *а* – на 30 хв; *б* – на 60 хв; *в* – на 90 хв; *г* – на 120 хв.

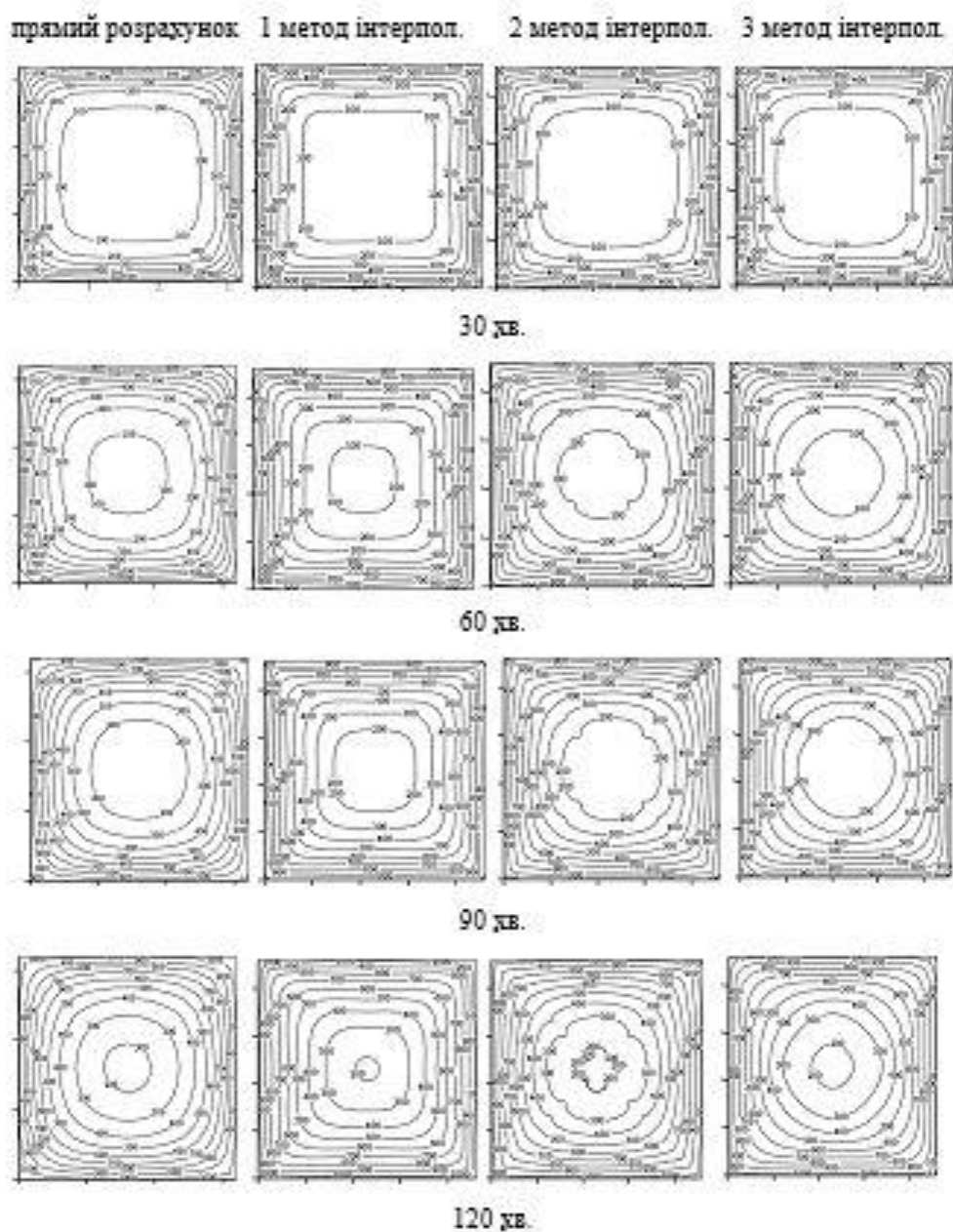


Рис. 2.15. Температурні розподіли у перерізі залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, визначені за різними методом інтерполяції.

Якщо порівнювати подані температурні розподіли то можна побачити, що отримані розподіли за першим методом інтерполяції мають досить завищені значення температур і ізотерми є менш заокругленими ніж ізотерми, розподілів, визначених прямим розрахунком. Другий підхід дає більш точне наближення, але поверхні температурних розподілів мають розриви за першою та другою похідними. Третій підхід дає гладкі поверхні температурних розподілів, але при цьому маємо суттєво завищені значення температур у кутових точках перерізу. Для більш точного аналізу співставимо початкові дані, тобто дані, що отримані при теоретичному

підході і відповідні результати інтерполяції, отримані різними методами. Результати порівняльного аналізу подані у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Дані порівняльного аналізу результатів інтерполяції, отриманих за різними методами

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

Дані табл. 2.3 свідчать про високу точність методів інтерполяції, однак, найбільш точним є третій метод. Всі розроблені методи можна використовувати для проведення наближення температурних розподілів за дискретними вимірюваннями температур у контрольних точках де встановлюються термопари.

2.3. Обґрунтування розташування контрольних точок вимірювання температури у перерізі залізобетонних колон

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

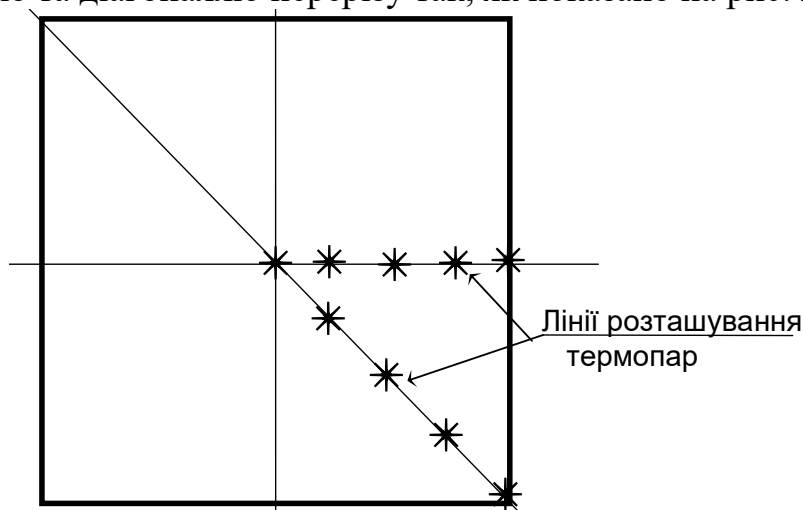


Рис. 2.16. Схема розташування термопар.

Для остаточного обґрунтування розташування термопар у перерізі колони необхідно визначити їх необхідну кількість. Особливості алгоритму проведення інтерполяції за розробленими методами розуміють розміщення однакової кількості термопар за лініями їх розташування. Дана кількість термопар визначається шляхом визначення похибки інтерполяції у

залежності від кількості контрольних точок на лініях розташування термопар. У результаті розрахунків були визначені означені залежності, які подані на рис. 2.17 у вигляді графіків.

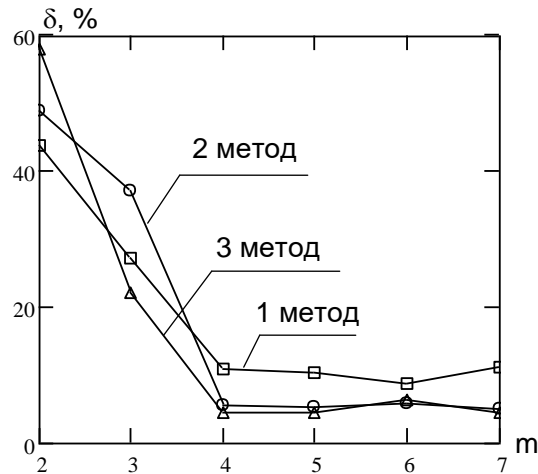


Рис. 2.17. Залежності похибки інтерполяції від кількості контрольних точок.

Згідно з графіками на рис. 2.17 мінімальна кількість контрольних точок вимірювання температури у перерізі колони складає 4.

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

- Твірні та січні поверхонь температурних розподілів у перерізах залізобетонних колон під дією «стандартної» пожежі є параболи.
- Був знайдений вигляд функції для наближення ізотерм у перерізі залізобетонних колон під дією «стандартної» пожежі.
- Були розроблені три методи інтерполяції температур за даними у дискретних контрольних точках перерізів залізобетонних колон.
- Найбільш адекватні результати інтерполяції отримуються за третім методом.
- Було обґрунтовано розташування і кількість контрольних точок вимірювання для отримання інтерполяції температур за виміряними даними.

РОЗДІЛ 3

ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Експериментальне обладнання

Для випробувань використовувалась вогнева піч, приміщення для кондиціонування зразків 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	2	3	4	5
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°C	Границі допустимої похибки вимірювання ± 1,5 °С
4	Термопари ТХА, 20 одиниць	-	від -50 до 1200 °С	Клас 2
5	Термопари 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 ЩЦ-Іа	0711110	від 0 до 300 мм	± 0,05 мм
8	Мановакуумметр 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-It	1504	Від 10кг до 1000кг	Клас точності - середній
13	Віддалемір лазерний ручний Disto D3a BT	90283060 0	Від 0,05 до 100м.	± 1 мм

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

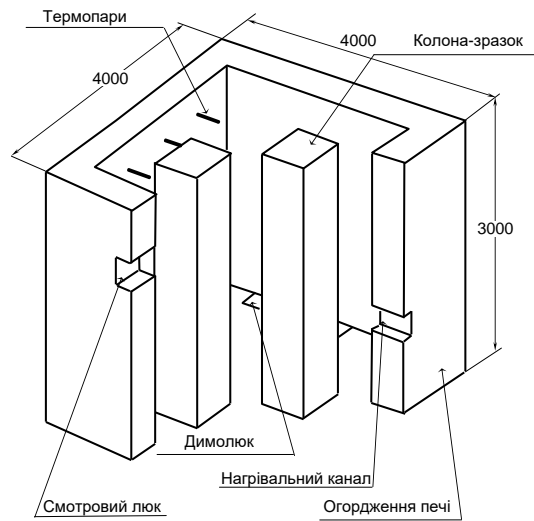


Рис. 3.1. Схема випробувальної установки.



а.



б.

Рис. 3.2. Загальний вигляд установки для випробувань: а – вид спереду; б – вид збоку.

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.

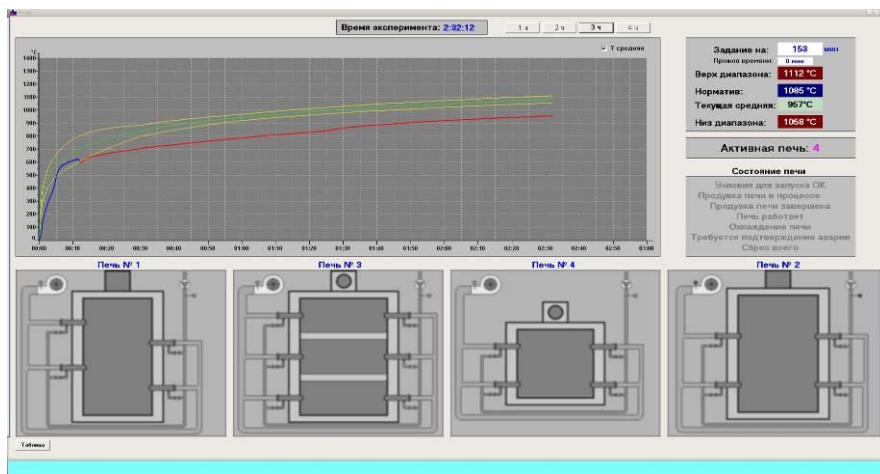
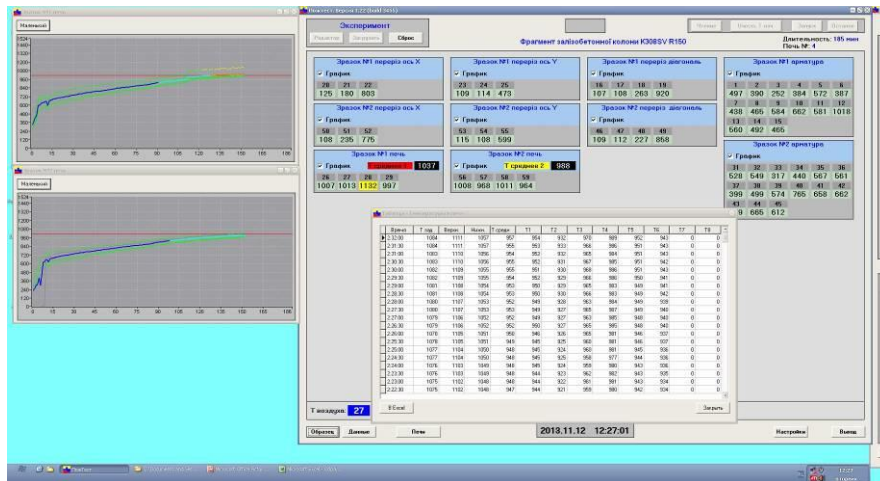


Рис. 3.4. Интерфейс програмного забезпечення системи контролю температур.

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

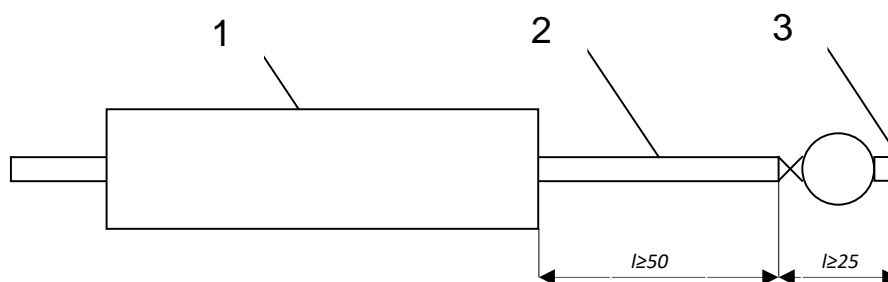


Рис. 3.5 Термопара для вимірювання температури в печі: 1 – теплозахисна оболонка; 2 – захисний кожух; 3 – вимірювальний спай.

3.2. Методика виготовлення та формування залізобетонних колон-зразків для випробування

Зразок для випробування являє собою залізобетонну колону квадратного перерізу розмірами 500×500 і довжиною 3000 мм. На рис. 3.6 показана геометрія перерізу та схема розташування арматури.

У табл. 3.2 зведені величини основних параметрів колони. Відповідно до технічної документації на дану залізобетонну колону вона має бути виготовлена з бетону С 40/45 (В40). Для виготовлення колони була застосована бетонна суміш, склад якої мав параметри, які наведені у табл. 3.3.

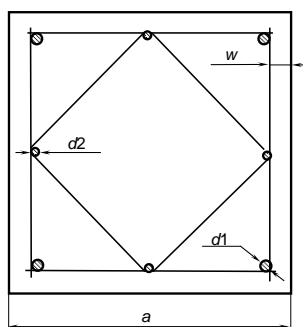


Рис. 3.6. Геометричні параметри та схема армування перерізу залізобетонної колони-зразку для випробувань

Таблиця 3.2

Основні параметри залізобетонних колон-зразків для випробувань

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
• ширина	a	0,5	м
• ширина захисного шару	w	0,03	
• висота колони	l	3	
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 40/45 (В40)	
Густина бетону	ρ_B	2230	кг/м ³
Водоцементне відношення	В/Ц	0,36	
Гранична вологість	u	< 3	%
Робоча арматура:		Клас А500С	
• діаметр більший	d_1	0,014	м
• діаметр менший	d_2	0,025	
Каркасна арматура:		Клас А240С	
• діаметр	d_3	0,008	м

Таблиця 3.3

Склад бетонної суміші для виготовлення залізобетонних колон-зразків для випробувань

Назва компоненту	Вміст у пропорціях на 1 м ³ , кг	Допустиме відхилення, кг
Портландцемент марки «500»	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 колона, що досліджується і є найпоширенішим при виготовлення залізобетонних колон, монолітно-каркасних споруд [98 – 101], а також досліджуваних зразків елементів конструкцій і моделей елементів конструкцій для вогневих випробувань, відомих з [32 – 34].

Формування зразків відбувалося за технологією заводу-виробника. При виготовленні зразків передбачалися глухі поздовжні 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 кондиціонування 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 бетонної суміші, з якої планувалось виготовлення колони, було виготовлено зразки-куби, за допомогою яких була визначена міцність зразка за методикою, що відповідає ГОСТ 10180-90. Означені дослідження показали відповідність бетону класу міцності, який був указаний в технічній документації на колону-зразок. Технічні характеристики бетону й арматурної сталі наведені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Технічні характеристики компонентів залізобетонних колон-зразків для випробувань

Найменування	Клас	Властивості	Параметри
Бетон важкий	C 40/45 (B40)	рядовий, гідротехнічний	Кубікова міцність – 55,3 МПа
Арматура $d_3 = 8$ мм	A240C	арматурна сталь	Крок – 200мм; площа поперечного перерізу 0,503 Міцність – 240 МПа
Арматура $d_2 = 14$ мм	A500C	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь	Міцність – 500 МПа
Арматура $d_1 = 25$ мм	A500C	термомеханічно-зміцнена арматурна сталь	Міцність – 500 МПа

Згідно з результатами досліджень попереднього розділу була встановлена необхідна кількість термопар у перерізі колони-зразку для випробувань. На рис. 3.7 представлена схема розташування термопар у перерізі колони зразку.

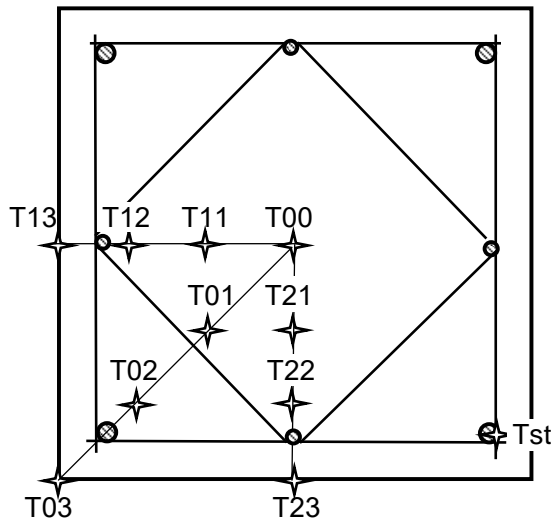


Рис. 3.7. Схема розташування термопар у перерізі залізобетонної колони-зразку для випробувань

Температура на арматурних стержнях контролювалася на трьох рівнях, як показано на рис. 3.8.

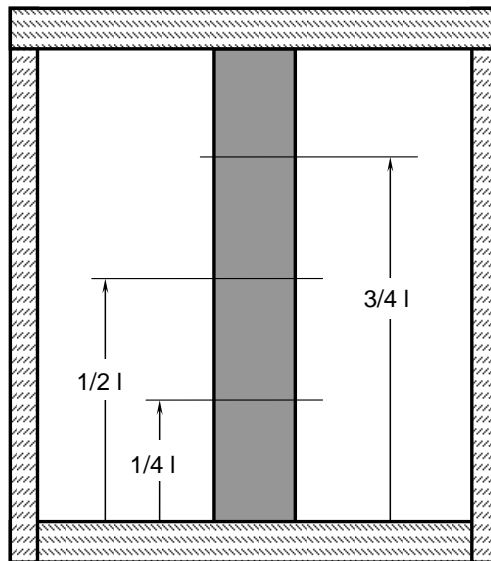


Рис. 3.8. Схема контролювання температур в арматурних стержнях залізобетонної колони-зразка

Температура у кожному з арматурних стержнів визначається як середнє значення температур на кожному з рівнів згідно з рис. 3.8

За описаною методикою були виготовлені залізобетонні колони-зразки для проведення випробувань, які зображені на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Вигляд залізобетонних колон-зразків для випробувань

На рис. 3.9 видно канали, через які проходять дроти термодатчиків у перерізі колони згідно зі схемою на рис. 3.7. 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 колони означене програмне забезпечення було відповідним чином доповнене персоналом випробувального центру «Пожтест». На рис. 3.10 зображений інтерфейс доповненого програмного забезпечення для контролю температур у перерізі.

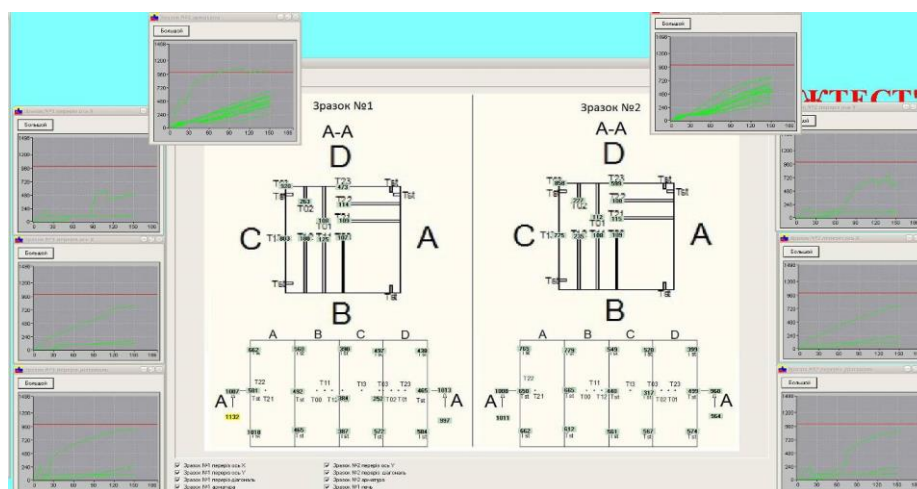


Рис. 3.10. Інтерфейс програмного забезпечення для контролю температур у перерізі колони під час вогневих випробувань

3.3. Методика вогневих випробувань залізобетонних колон

3.3.1. Методика підготовки обладнання та зразків до випробувань.

Зразки-близнюки залізобетонних колон встановлювалися у вогневу піч як показано на схемі на рис. 3.1. При цьому нижні кінці колон для надання їм відповідної жорсткості бетонувалися до дна печі а верхні притискалися бетонними плитами її кришки. На рис 3.11 показана установка у зборі готова до випробувань. Для запобігання виходу гарячих газів з печі щілини та отвори між кришкою та стінками печі були ізольовані шаром мінеральної вати завтовшки 120 мм та густиною 120 кг/м³. Отвори оглядових люків були закриті пінобетонними плитами товщиною 150 мм та густиною 450 кг/м³.



Рис. 3.11. Вигляд установки для випробування залізобетонних колон у зборі, готової до проведення експериментів.

3.3.2. Методика проведення випробувань

Випробування проводились при температурі 18⁺¹°C та відносній вологості повітря 55%, що відповідає вимогам [33 – 34].

Проведення випробувань залізобетонних колон-зразків здійснювалося за методом, що регламентований [33 – 34]. Метод випробувань полягає у визначенні проміжку часу від початку випробування за температурним режимом згідно з [35] за вогневого впливу з кожної з чотирьох сторін колони [32].

Межа вогнестійкості конструкції визначається за формулою [35]:

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

де: t_{fr} – межа вогнестійкості конструкції, хв., t_{mes} – значення часу від початку випробувань до досягнення граничного стану з вогнестійкості, Δt – 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 [1].

- Якщо $A_f \geq A_s$, то $t=0$.
- Якщо $A_f < A_s$, то похибку Δt 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):

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

де: T_{mini} - 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 [33]. Для випробувань було використано два зразки-близнюки залізобетонної колони.

Прогин зразка в центрі колони, в ході навантаження та в процесі випробування вимірювалися віддалеміром лазерним.

Підсумовуючи все вищесказане, можна узагальнити:

- об'єктами для вивчення є два зразки-близнюки з залізобетонних колон квадратного перерізу розміром 500×500 довжиною 3 м з важкого бетону однакового складу на гранітному заповнювачі (щебенях) класу міцності С 40/45 (В40) і робочою арматурою класу А500С діаметром 25 мм з відповідно введеною вглиб системою термопар для контролю температур у внутрішніх шарах колони та на арматурних стержнях.

- основні дослідження зразків відбуваються за допомогою установки, що складається з вогневої печі з паливно-форсунковою системою на дизельному паливі з автоматичним керуванням без прикладання відповідного механічного навантаження;

- для попереднього дослідження механічних властивостей бетону використовується стандартна методика;

- експеримент проводиться протягом контрольного часу, який відповідає найбільшій межі вогнестійкості для залізобетонних колон згідно з ДБН 1.1.7 – 2002 Пожежна безпека об'єктів будівництва

- висновок про настання граничного стану втрати несучої здатності робиться на основі відповідної розрахункової інтерпретації результатів вимірювання під час випробувань.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

4.1. Результати вогневих випробувань залізобетонних колон

Використовуючи експериментальні методики, що описані у попередньому розділі були проведені відповідні вогневі випробування двох залізобетонних колон-близнюків. Після проведення випробувань зразки мали вигляд, який показаний на рис. 4.1 та рис. 4.2.



Рис. 4.1. Вигляд залізобетонної колони-зразку №1 з чотирьох боків після проведення вогневих випробувань



Рис. 4.2. Вигляд залізобетонної колони-зразку №2 з чотирьох боків 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 обидві колони були пошкоджені. По всій поверхні колони спостерігається розвинена система тріщин, що утворилися внаслідок дії тиску пари у порах бетону, а також неоднакового розширення цементного каменю та крупного заповнювача. По граням колони спостерігалось відколювання шару бетону. Поверхня бетону колон має сліди вологи, яка випаровувалася з неї. Крім цього, спостерігалися одиничні воронки та каверни, які зумовлені наявними локальними дефектами бетону. На рис. 4.3 показаний вигляд вказаних ушкоджень.



а.



б.



в.

г.

Рис. 4.3. Ушкодження колон-зразків після вогневих випробувань: *а* – 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. 4.4.

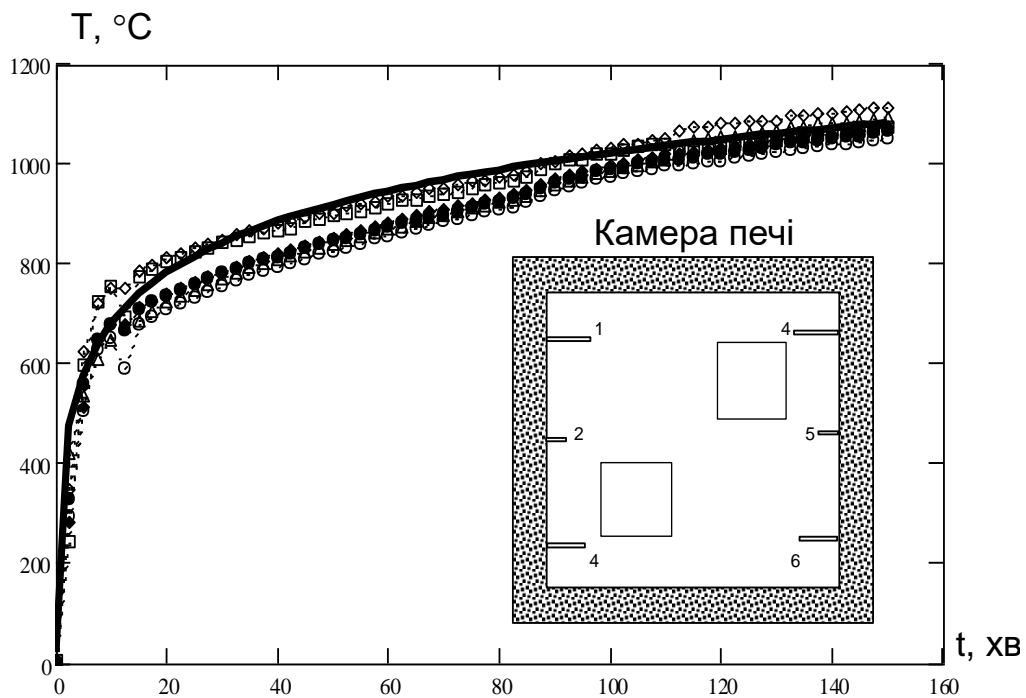


Рис. 4.4. Показники термопар у камері печі (нумерація згідно зі схемою):

- – показники 1 термопари
- – показники 2 термопари
- △△△ – показники 3 термопари
- ◇◇◇ – показники 4 термопари
- ◆◆◆ – показники 5 термопари
- – показники 6 термопари
- — стандартна температурна крива пожежі

Графіки на рис. 4.4 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 [33, 34] використовують середнє значення температури за показниками всіх термопар у просторі печі. На рис. 4.5 подана залежність середньої температури від часу випробування.

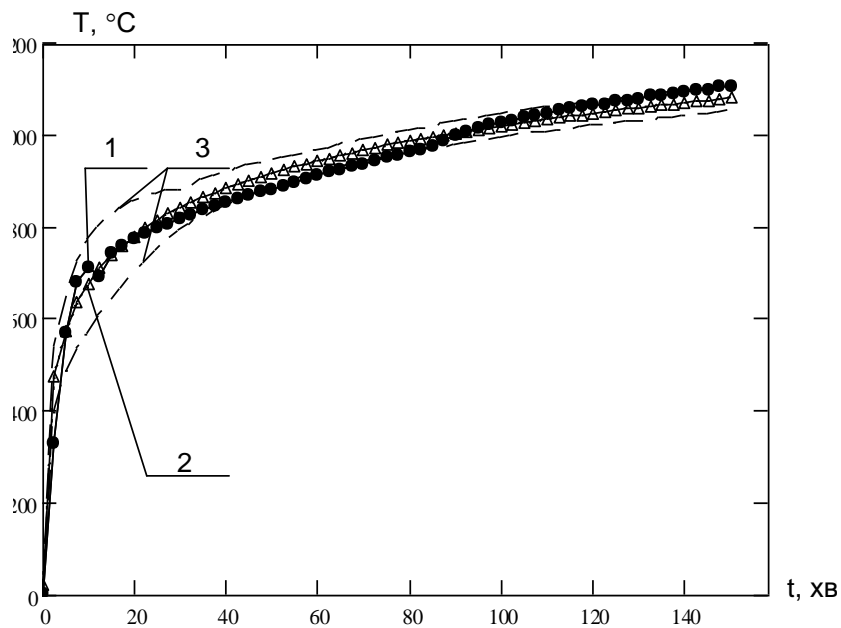
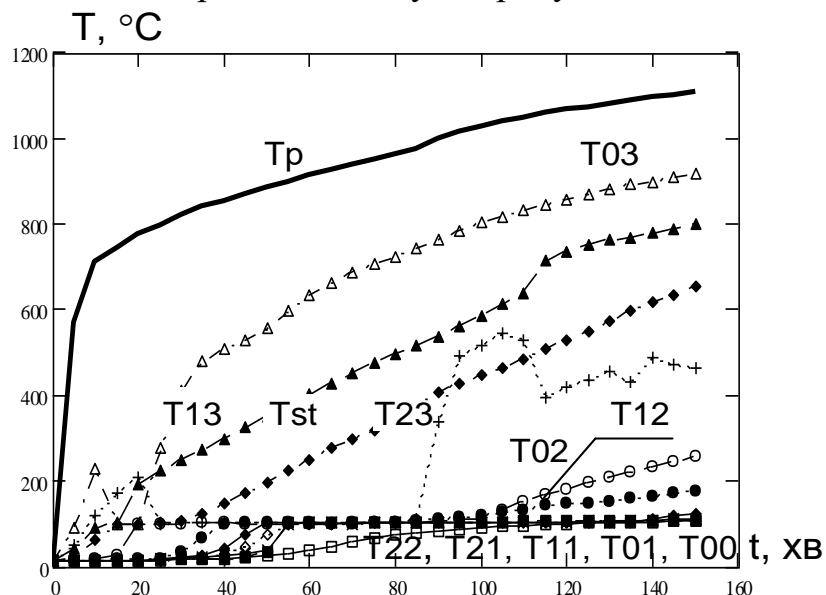


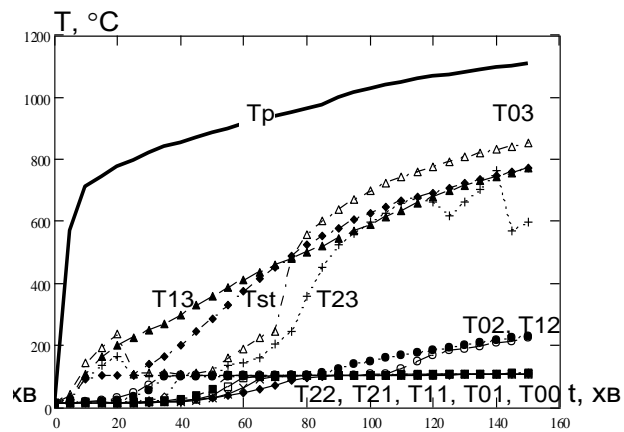
Рис. 4.5. Температурний режим випробувань в печі: 1 – середня температура в печі, 2 – стандартна температурна крива, 3 – допустимі відхилення температурного режиму.

Дані на рис. 4.5 свідчать про те, що режим випробувань повністю відповідає вимогам стандартів України щодо випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон.

Методика проведених вогневих випробувань дала змогу провести вимірювання температури у внутрішніх шарах колони. На рис. 4.6 подані залежності температур у контрольних точках внутрішніх шарів залізобетонних колон-зразків від часу випробувань.



a.



б.

Рис. 4.6. Результати вимірювань температури у внутрішніх шарах залізобетонних колонах-зразках під час випробувань згідно зі схемою розташування термопар (див. рис. 3.7): 1 – колона-зразок №1; 2 - колона-зразок №2.

Аналізуючи графіки температур на рис. 4.6 можна помітити їх важливі особливості. Всі графіки однакових положень термопар є подібними, що підтверджують добру відтворюваність експерименту. Показники термопар у глибинних шарах колони мають протяжну ділянку в області 100 °С, що збігається з уявленнями про фізико-хімічні процеси, які протікають у внутрішніх шарах бетону при його високотемпературному нагріві. Залежності температури контрольної точки T23 мають спадні гілки у області 500-600 °С, що пояснюється впливом ендотермічних реакцій розкладання цементного каменя.

Важливим показником, який має суттєве значення є показники температури у місцях розташування арматурних стержнів. Температурні режими нагріву арматурних стержнів у колонах зразках під час їх вогневих випробувань подані на рис. рис. 4.7 – 4.9.

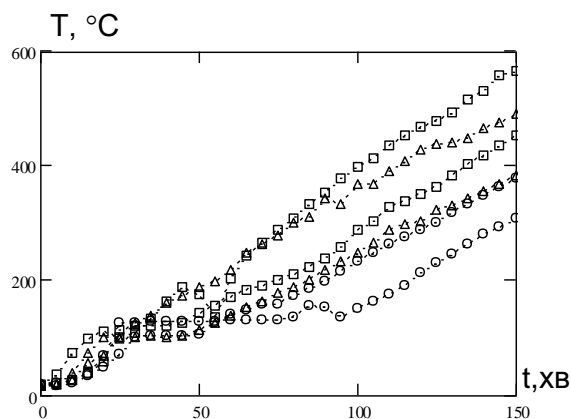


Рис. 4.7. Показники термопар на 1 та 2 арматурних стержнях на різних рівнях колони-зразка №1:

□□□ – 1/4 висоти колони-зразка

$\circ\circ\circ$ – 1/2 висоти колони-зразка
 $\triangle\triangle\triangle$ – 3/4 висоти колони-зразка

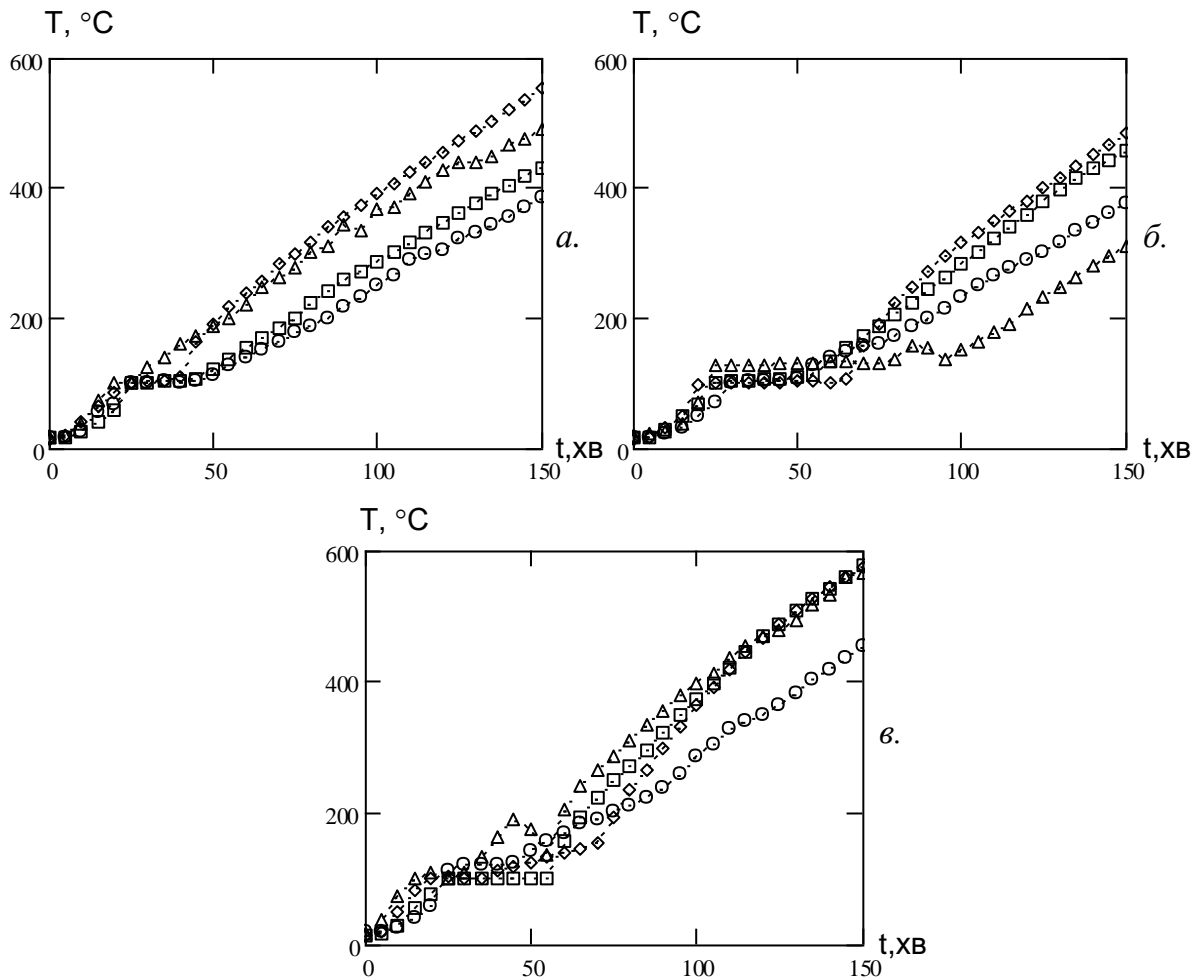


Рис. 4.8. Показники термопар на 1 – 4 арматурних стержнях на різних рівнях колони-зразка №1:

$\square\square\square$ – 1 арматурний стержень
 $\circ\circ\circ$ – 2 арматурний стержень
 $\triangle\triangle\triangle$ – 3 арматурний стержень
 $\diamond\diamond\diamond$ – 4 арматурний стержень

Аналіз графіків на рис. 4.7 показує що на різних рівнях температура арматурних стержнів істотно розрізняється, що зумовлюється нерівномірним нагрівом камери за висотою. Графіки на рис 4.8 свідчать. Температура арматурних стержнів у перерізі на певному рівні суттєво не відрізняється, що попередньо дозволяє зробити висновок про можливість наближення поверхні розподілення температури по перерізу колони за допомогою розроблених способів інтерполяції.

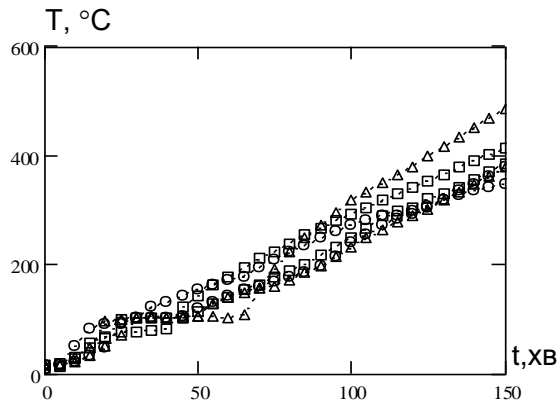


Рис. 4.9. Показники 2 термопар на 1 арматурному стержні на різних рівнях колони-зразка №1:

- – 1/4 висоти колони-зразка
- – 1/2 висоти колони-зразка
- △△△ – 3/4 висоти колони-зразка

Аналіз графіків на рис. 4.9. показує, що термопари у контрольних точках на арматурному стержні №1 колони-зразка №1 мають несуттєві відмінності і для інтерпретації даних вогневих випробувань необхідно використовувати середнє значення температури в арматурних стержнях.

Подібні температурні залежності були отримані і для другої залізобетонної колони-зразка.

На рис. 4.10 показані графіки середніх температур з відповідними відхиленнями, які були отримані для результатів температурних вимірювань у контрольних точках простору вогневої печі.

Графіки на рис. 4.10 свідчать про те що створення температурного режиму у печі є відповідною до вимог стандартів [33, 34]. Розкид температур по простору печі є незначним.

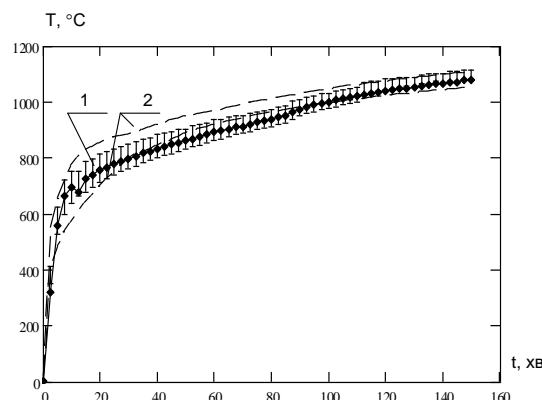


Рис. 4.10. Відхилення температур в печі від середнього значення: 1 – середня температура в печі, 2 – допустимі відхилення температурного режиму

На рис. 4.11 показані графіки середніх температур з відповідними відхиленнями, які були отримані для всіх контрольних точок перерізів залізобетонних колон-зразків.

Маючи вищеописану статистику вимірювань для двох залізобетонних колон-зразків можна визначити статистичні показники результатів проведеного випробування. У якості основного статистичного показника була визначена дисперсія відтворюваності за формулою (2.5). Аналізуючи графіки на рис. 4.10, можна побачити, що найбільші відхилення виникають на інтервалі з 40 хвилини по 70 хвилину випробування. Це пов'язано з прогріванням внутрішніх шарів колони до температури 100 °С, коли відбувається інтенсивне пароутворення. Інша ділянка великих відхилень на інтервалі з 90 по 140 хвилину, що пов'язана з протіканням реакцій розкладання цементного каменя.

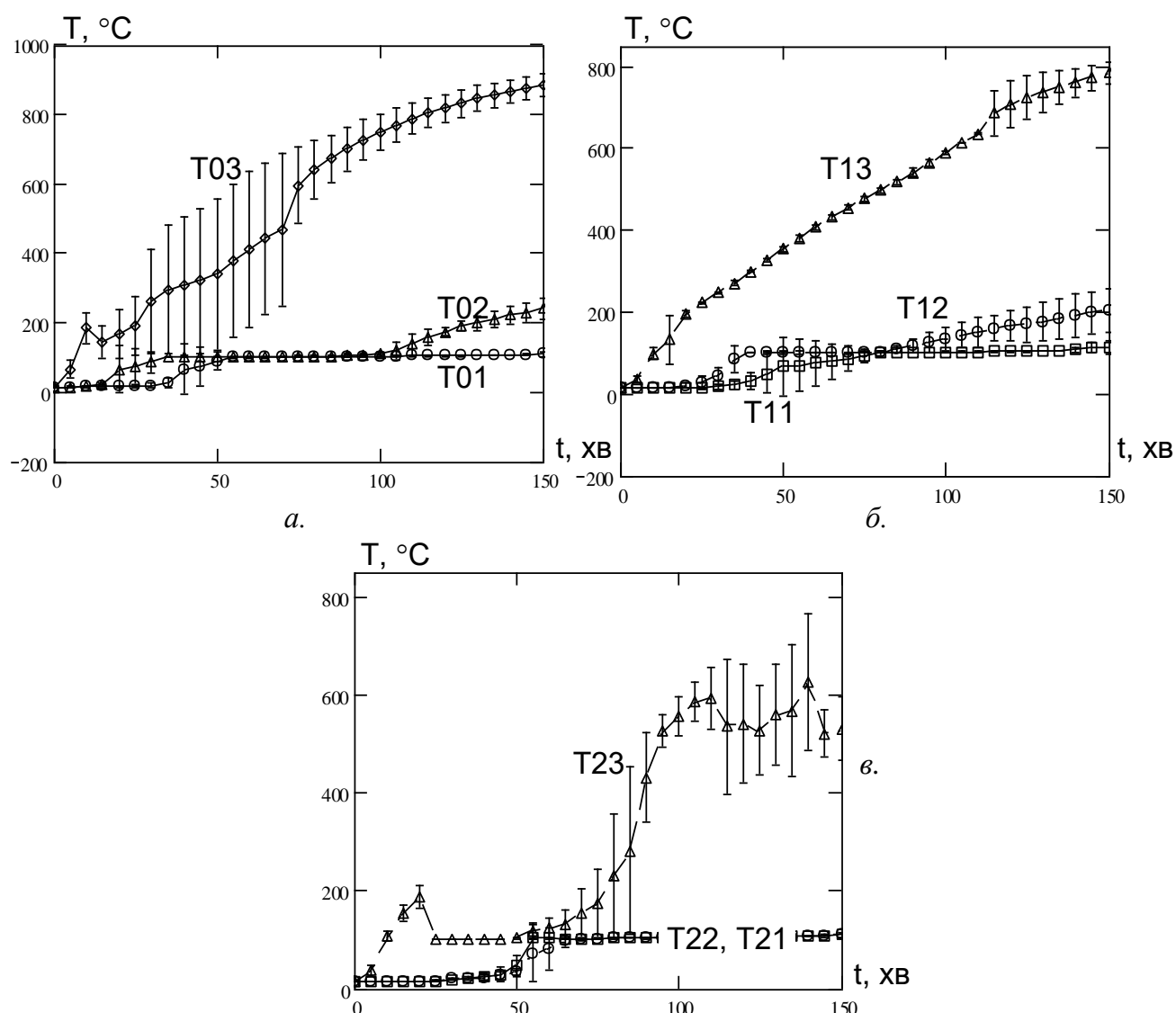


Рис. 4.11. Середня температура у внутрішніх шарах залізобетонних колонах-зразках під час випробувань згідно зі схемою розташування терморезисторів (див. рис. 3.7): а – діагональ; б – горизонталь; в – вертикаль.

У табл. 4.1 подані значення дисперсії для кожної з контрольних точок перерізу колон-зразків.

Дані табл. 4.1 вказують на помітну розбіжність експериментальних даних, проте вона є несуттєвою у межах допустимої похибки.

Також була проаналізована відтворюваність вимірювань температур, проведених на арматурних стержнях. На рис. 4.12 та рис. 4.13 показані графіки середніх температур в арматурних стержнях колони-зразка №1 з відхиленнями.

Таблиця 4.1

**Параметри відтворюваності вимірювань температури
в контрольних точках перерізу**

Параметр	Контрольна точка перерізу (див. рис. 3.7)									
	T00	T01	T02	T03	T11	T12	T13	T21	T22	T23
Максимальне відхилення від середнього значення, °C	22	25	65	206	29	59	94	37	45	127
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	5,1	4,9	6,2	17,9	5,4	5,9	11,6	5,3	7,4	16,7
Дисперсія відтворюваності	3,15	3,36	7,87	30,69	3,28	6,64	14,74	5,53	8,11	16,58

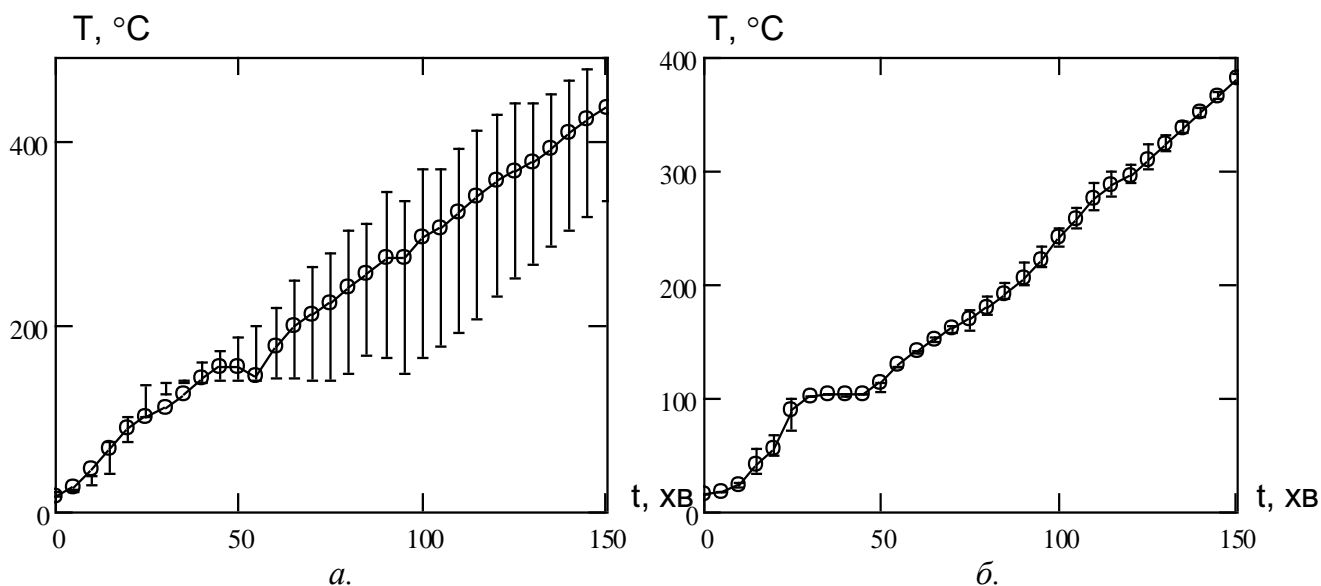


Рис. 4.12. Середня температура в арматурних стержнях колони-зразка №1: *a* – 1 арматурний стержень; *б* – 2 арматурний стержень;

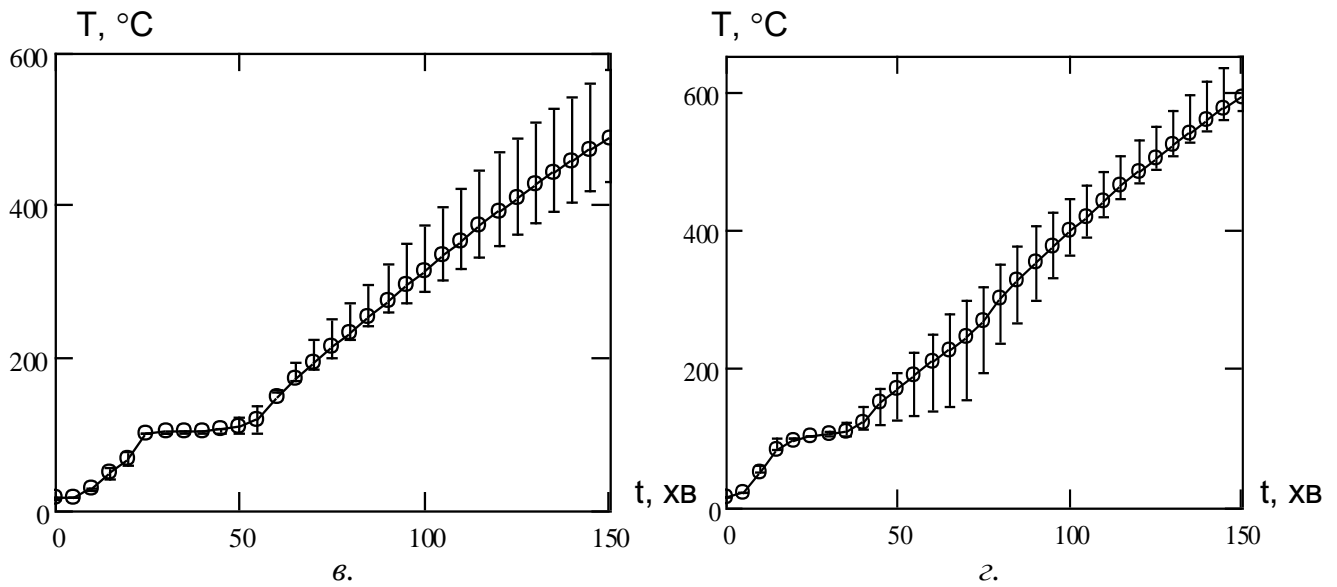


Рис. 4.13. Середня температура в арматурних стержнях колони-зразка №1: *a* – 3 арматурний стержень; *б* – 4 арматурний стержень;

Подібні графіки були отримані і для колони-зразка №2.

Для оцінки похибки показників термопар на 1 арматурних стержнях колон-зразків у контрольних точках було встановлено по дві термопари, як показано на схемі рис. 4.14.

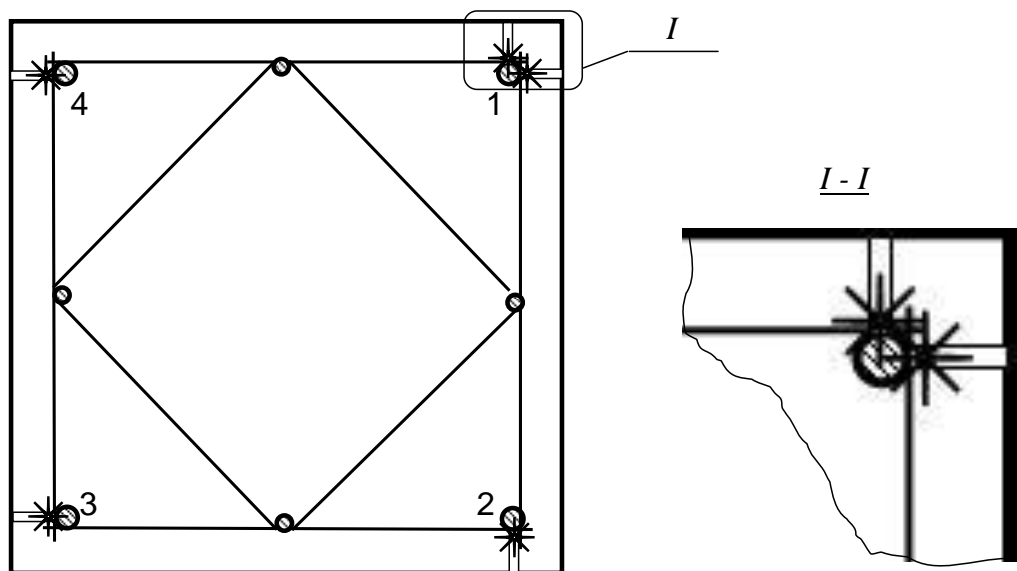


Рис. 4.14. Схема розташування термопар на 1 арматурному стержні.

На рис. 4.15 показані графіки середніх температур показників термопар з відповідними відхиленнями в 1 арматурному стержні колон-зразків №1 та №2.

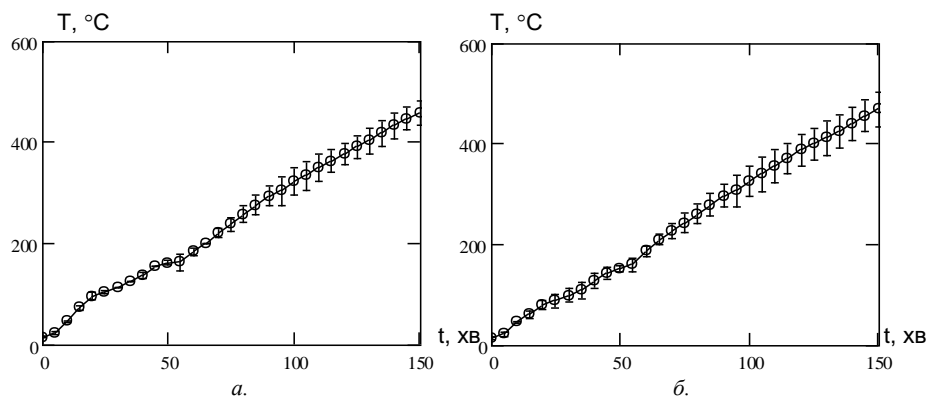


Рис. 4.15. Середня температура в 1 арматурному стержні: *a* – колона-зразок №1; *б* – колона-зразок №2.

У табл. 4.2 подані значення дисперсії для кожної з контрольних точок арматурних стержнів колон-зразків.

Дані рис. рис. 4.12 – 4.15 та табл. 4.2 та 4.3 також вказують на помітну розбіжність експериментальних даних, проте вона є несуттєвою у межах допустимої похибки.

Таблиця 4.2

Параметри відтворюваності вимірювань температури в арматурних стержнях

Параметр	Контрольний арматурний стержень (див. рис. 4.14)			
	Арматурний стержень №1	Арматурний стержень №2	Арматурний стержень №3	Арматурний стержень №4
Колонна-зразок №1				
Максимальне відхилення від середнього значення, °C	188	33	82	54
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	14,5	5,2	8,8	6,1
Дисперсія відтворюваності	29,5	7,6	16,4	10,7
Колонна-зразок №2				
Максимальне відхилення від середнього значення, °C	42	205	34	78
Середнє відносне відхилення від середнього значення, %	5,4	16,9	5,3	8,2
Дисперсія відтворюваності	9,1	29,2	8,4	11,9

4.2. Інтерполяція температур у перерізі колони за результатами випробувань

За результатами випробувань, що описані в попередньому пункті за алгоритмами, що були описані у 2 розділі даної роботи була проведена інтерполяція температур з метою відновлення температурного поля у перерізі колон, які піддані вогневим випробуванням. На рис. рис. 4.16 – 4.19 подані розподілення температур, що отримані за допомогою інтерполяції.

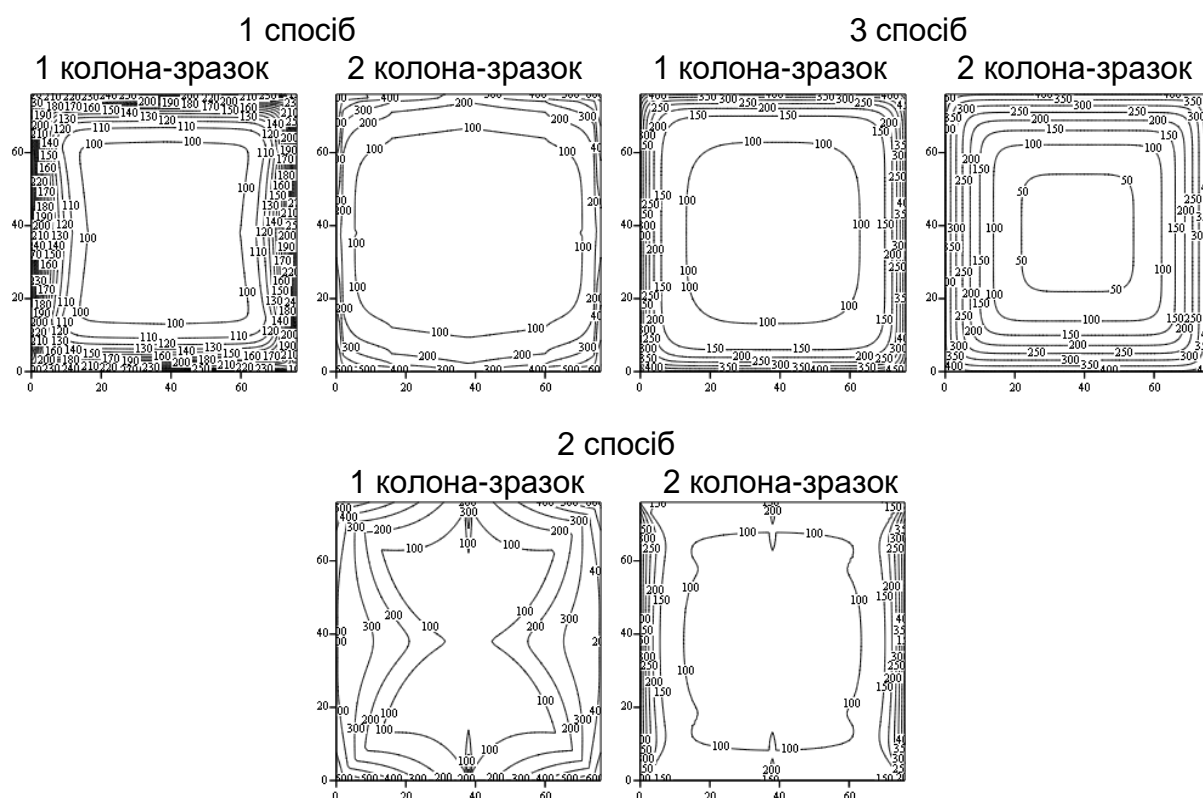


Рис. 4.16. Результати інтерполяції температур (°C) в перерізі колони на 60 хв випробування.

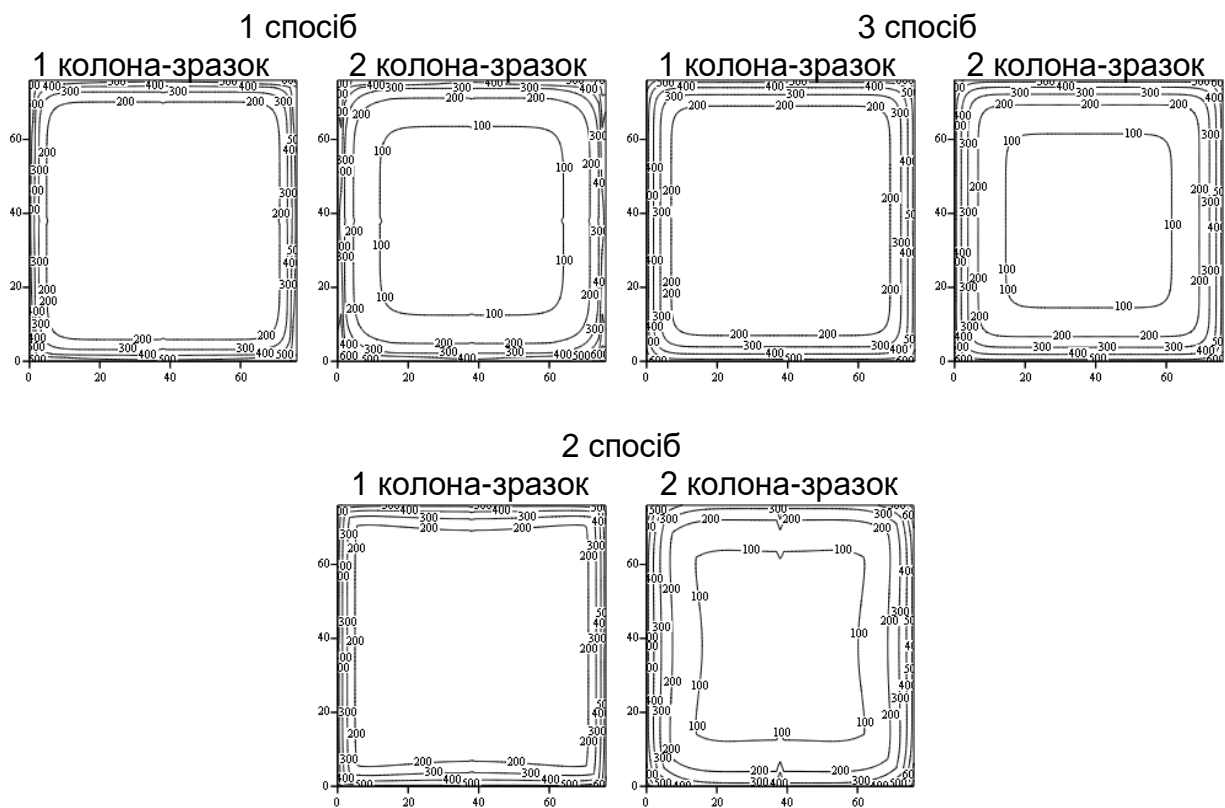


Рис. 4.17. Результати інтерполяції температур ($^{\circ}\text{C}$) в перерізі колони на 90 хв випробування.

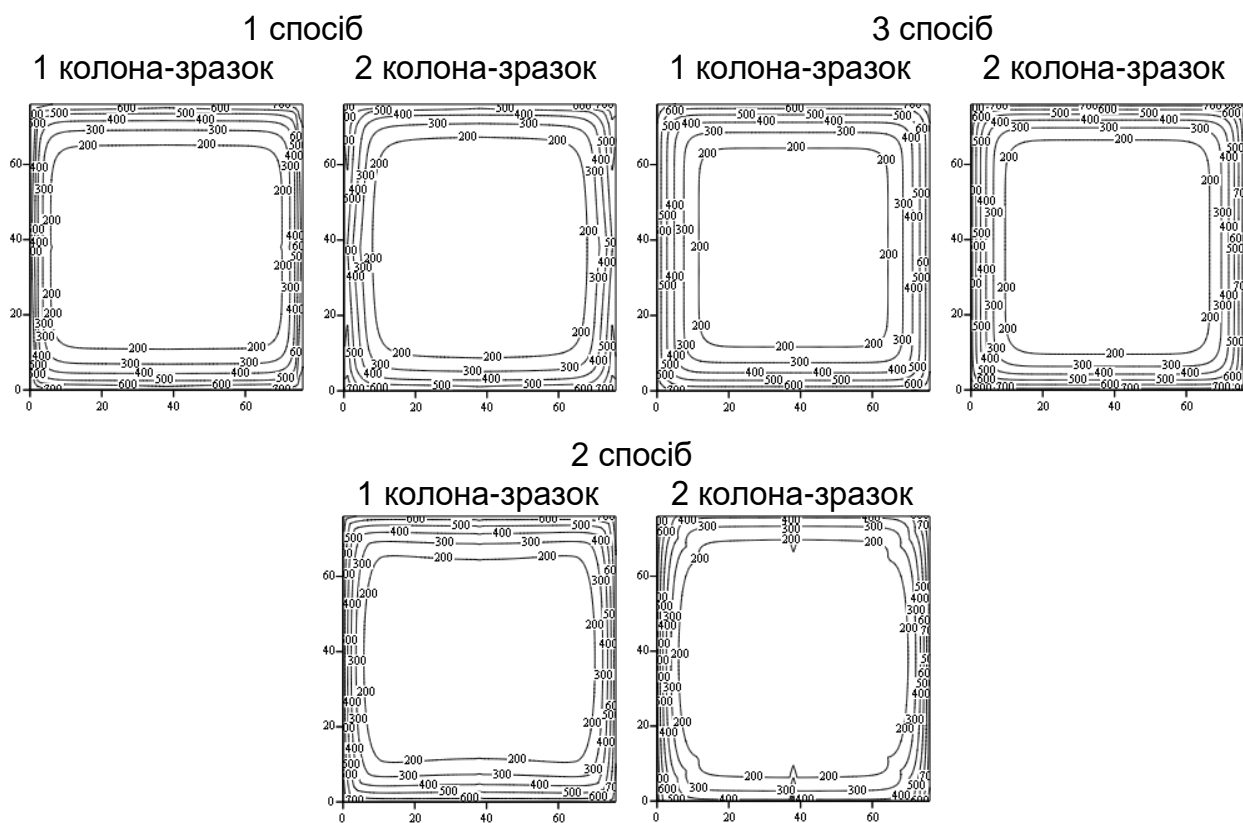


Рис. 4.18. Результати інтерполяції температур ($^{\circ}\text{C}$) в перерізі колони на 120 хв випробування.

Аналізуючи результати проведеної інтерполяції, можна помітити, що вони дають приблизно однакові розподілення. Інтервали з 40 хвилини по 70 хвилину випробування та з 90 по 140 хвилину дають нестійкі результати, а отримані розподілення температури за 2 способом на цих інтервалах взагалі мають нефізичну картину.

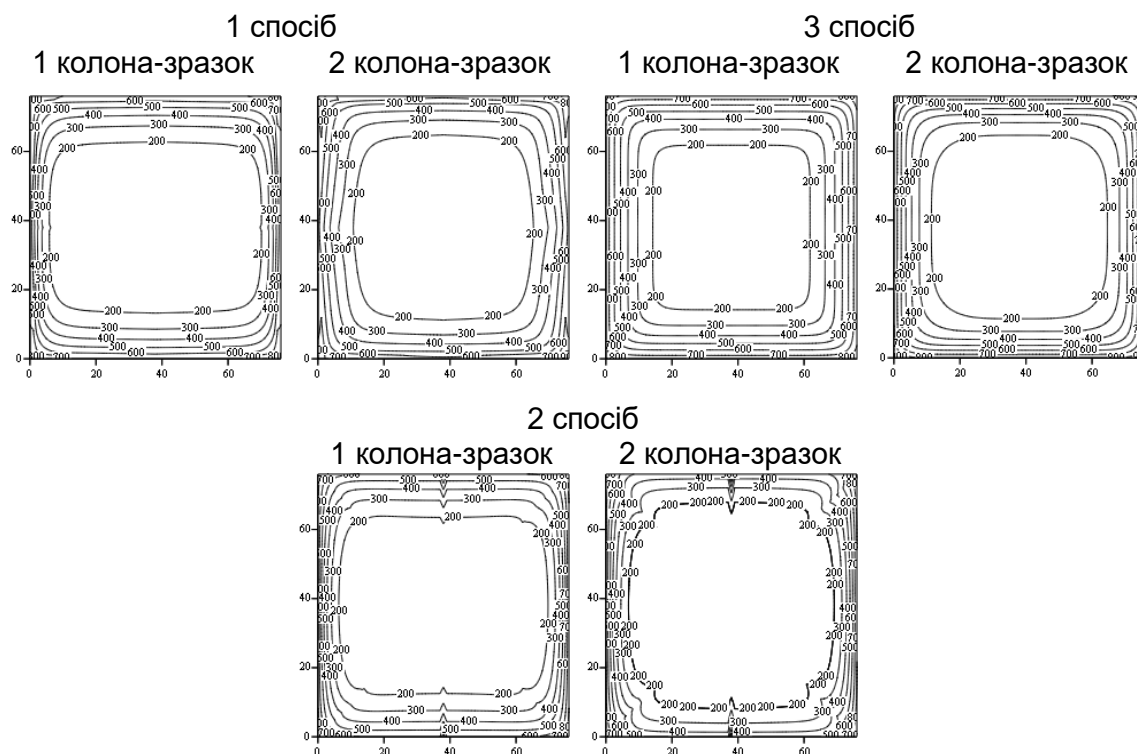


Рис. 4.19. Результати інтерполяції температур ($^{\circ}\text{C}$) в перерізі колони на 150 хв випробування.

Тим не менше проведення інтерполяції за 1 та 3 способом дають надійні результати, а обчислювальні алгоритми є стійкими і їх збіжність не залежить від суттєвої нерівномірностей та стрибків температури, які мають місце при проведенні випробувань. Попередньо можна зазначити, що застосування 3 методу інтерполяції є більш доцільним, оскільки цей спосіб дає гладкі і симетричні розподілення, що узгоджується з теоретичними уявленнями. Крім цього, застосування 3 методу зумовлює більш жорсткий вплив, що зумовлює певний запас міцності залізобетонних колон при пожежі.

4.3. Оцінка адекватності результатів інтерполяції температур

Оцінку адекватності отриманих даних у результаті інтерполяції будемо проводити за допомогою методики, що описана у другому розділі цієї роботи. На рис. 4.20 та рис. 4.21 показані відхилення температурних кривих різних контрольних точок перерізу досліджуваних колон-зразків для даних інтерполяції за 1 способом.

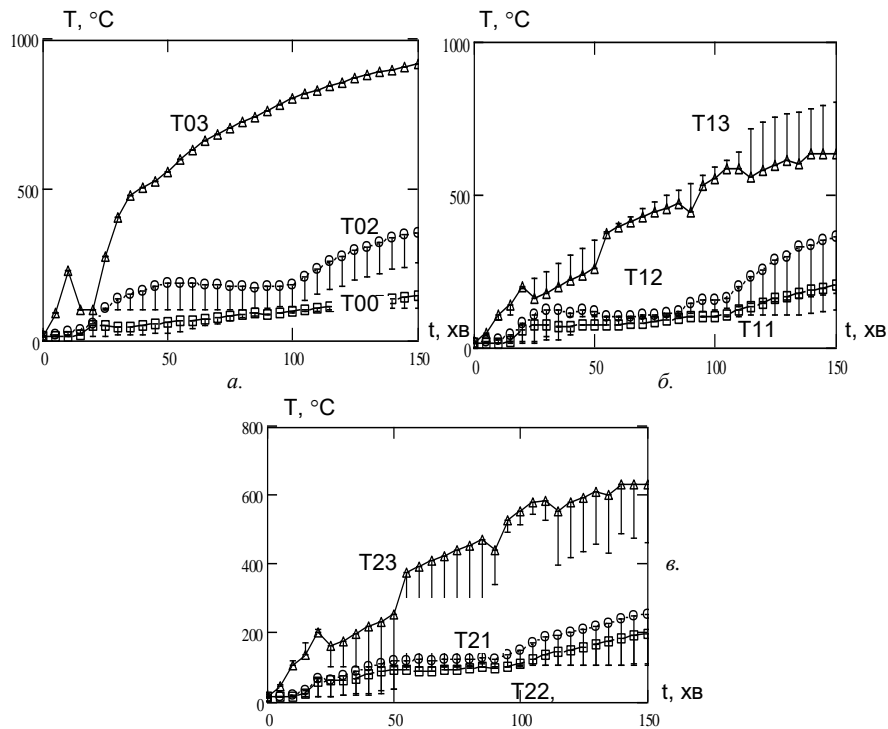


Рис. 4.20. Температура у внутрішніх шарах залізобетонної колони-зразка №1 під час випробувань за даними інтерполяції за 1 способом: *a* – діагональ; *б* – горизонталь; *в* – вертикаль.

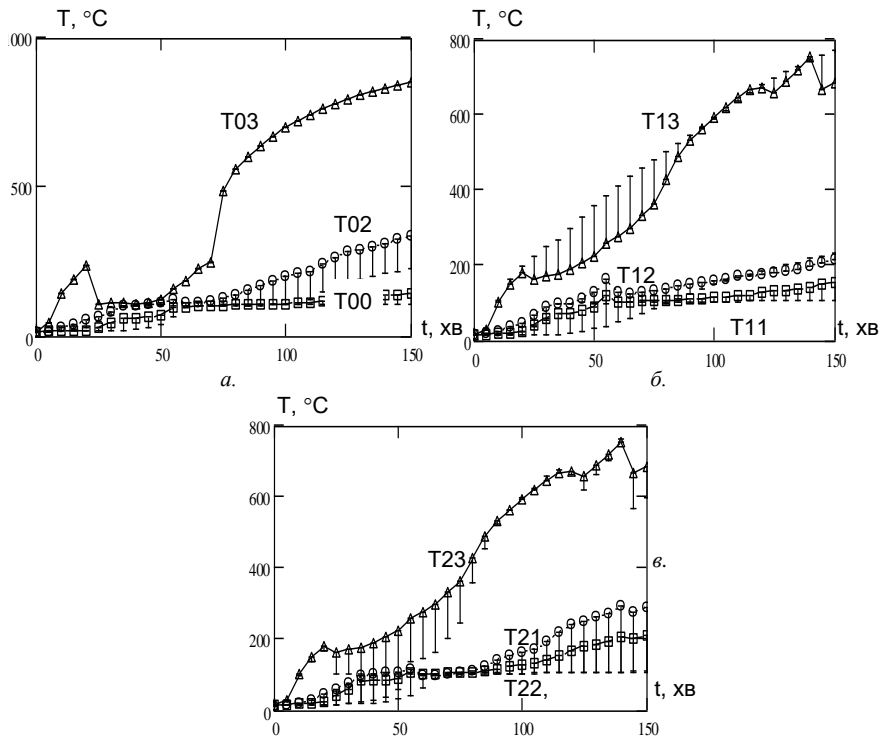


Рис. 4.21. Температура у внутрішніх шарах залізобетонної колони-зразка №1 під час випробувань за даними інтерполяції за 3 способом: *a* – діагональ; *б* – горизонталь; *в* – вертикаль.

На рис. 4.22 та рис. 4.23 показані відхилення температурних кривих різних контрольних точок перерізу досліджуваних колон-зразків для даних інтерполяції за 2 способом.

Аналіз графіків на рис. рис. 4.20 – 4.23 показав, що відхилення інтерполяційних даних від даних експериментів лежать в межах розкиду температур, що був виявлений в ході аналізу експериментальних даних (див. рис. 4.11).

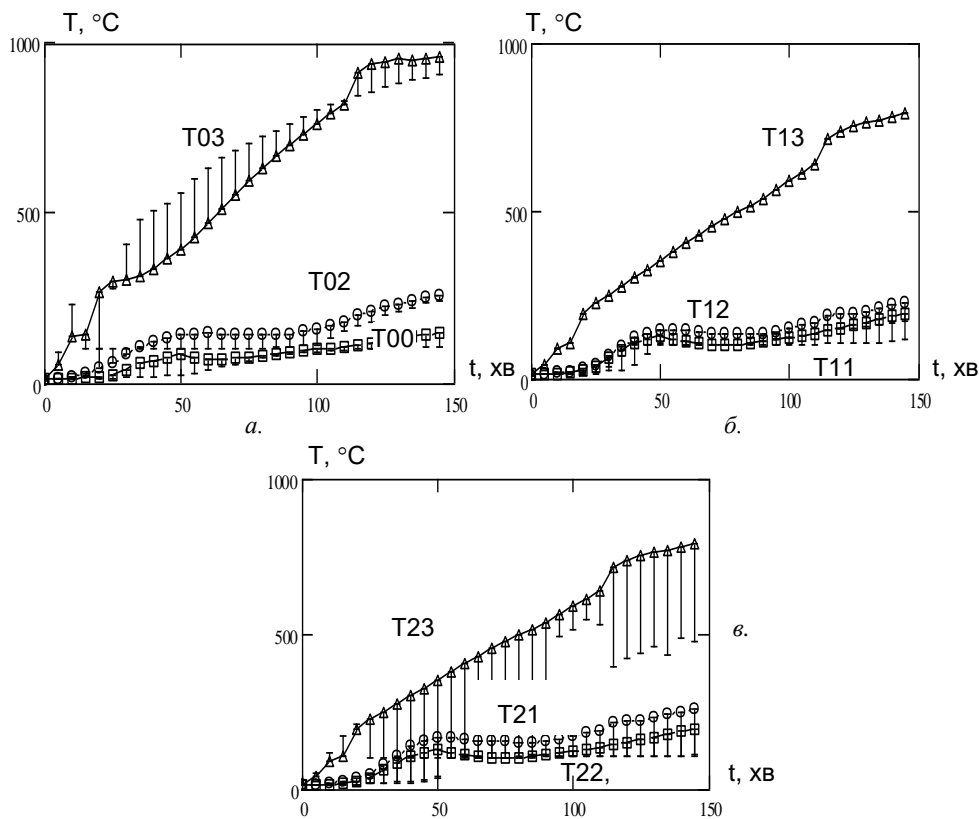


Рис. 4.22. Температура у внутрішніх шарах залізобетонної колони-зразка №2 під час випробувань за даними інтерполяції за 1 способом: *а* – діагональ; *б* – горизонталь; *в* – вертикаль.

Характерною особливістю інтерполяції за третім способом є те, що значення температури за трьома контрольними лініями перерізу перевищують значення виміряних температур. Для цього береться вертикаль або горизонталь з найбільшими температурами. Це дає змогу збільшити жорсткість температурного впливу з метою закласти певний запас міцності.

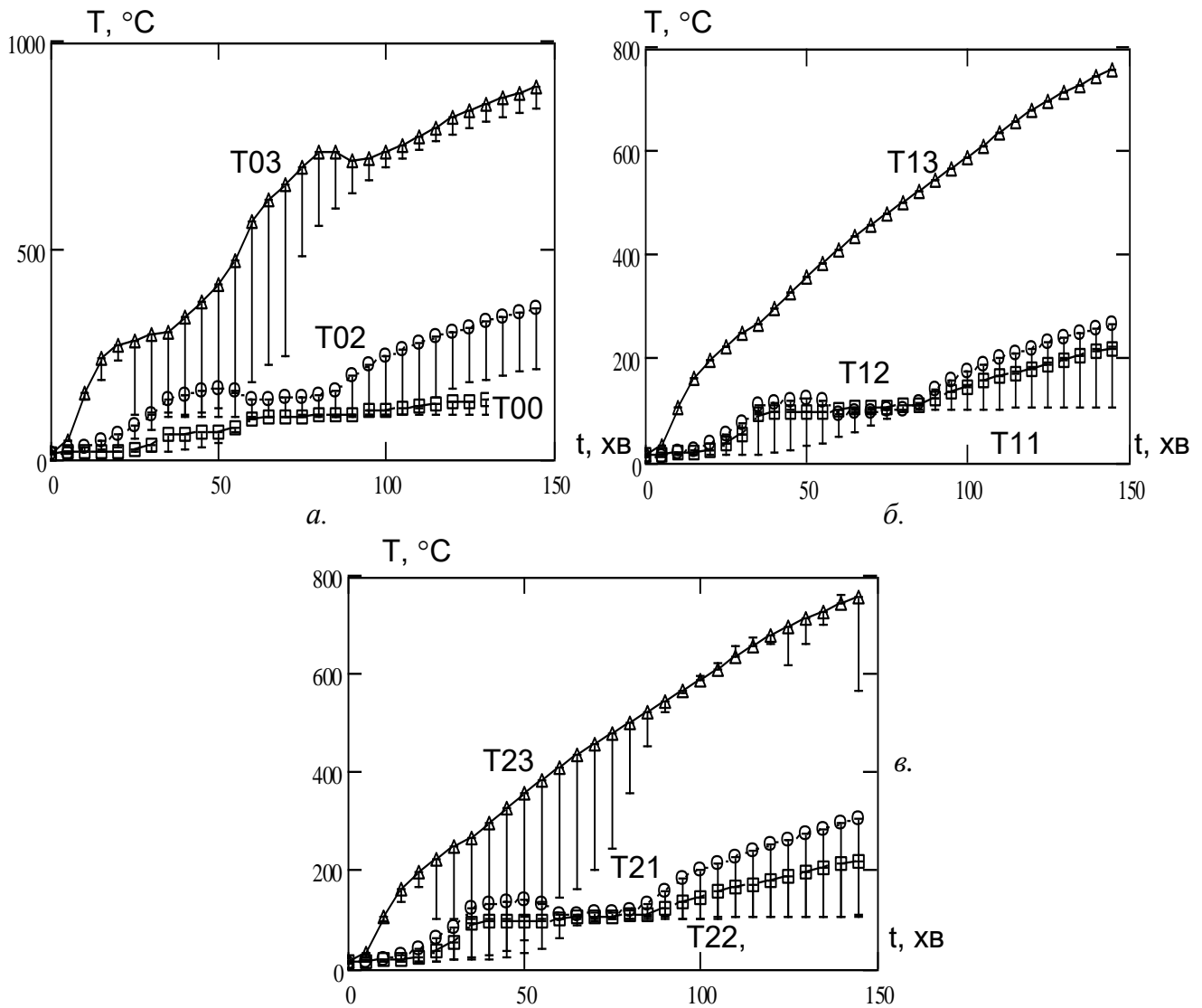


Рис. 4.23. Температура у внутрішніх шарах залізобетонної колони-зразка №2 під час випробувань за даними інтерполяції за 3 способом:
a – діагональ; *б* – горизонталь; *в* – вертикаль.

Для більш детального аналізу адекватності результатів в кожній контрольній точці колон-зразків був проведений розрахунок F-критерію за формулами (2.4) та (2.5). Як окрема експериментальна ситуація розглянуто випробування одної з колон-близнюків. Результати розрахунку наведені у табл. 4.3. Висновок про адекватність робився на основі розрахункового значення з табличним при рівні значущості 0,05.

Таблиця 4.3

**Статистичні параметри при дослідженні адекватності результатів
апроксимації температурних розподілів у колоні-зразку №1 за першим
способом інтерполяції**

Контрольна точка перерізу	Число ступенів вільності чисельника, ν_1	Число ступенів вільності знаменника, ν_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія S^2 відтворюваності,	Дисперсія S^2_{ad} адекватності,	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. [100].	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
1 спосіб інтерполяції										
T00	151	302	2	152	3,15	0	0	1,01	0	0
T01	151	302	2	152	3,36	2,05	0,781		19,5	33,4
T02	151	302	2	152	7,87	6,55	0,693		12,9	34,41
T03	151	302	2	152	30,69	0	0		0	0
T11	151	302	2	152	3,28	2,98	0,825		14,5	44,5
T12	151	302	2	152	6,64	4,42	0,443		12,9	28,9
T13	151	302	2	152	14,74	9,5	0,415		0,5	5,7
T21	151	302	2	152	5,53	5,41	0,957		17,8	22,1
T22	151	302	2	152	8,11	6,98	0,741		19,3	22,4
T23	151	302	2	152	16,58	13,77	0,69		3,2	12,9
3 спосіб інтерполяції										
T00	151	302	2	152	3,15	0	0	1,01	0	0
T01	151	302	2	152	3,36	3,28	0,953		18,7	39,6
T02	151	302	2	152	7,87	5,64	0,514		14,6	31,32
T03	151	302	2	152	30,69	18,28	0,355		12,3	22,1
T11	151	302	2	152	3,28	3,15	0,922		15,1	41,6
T12	151	302	2	152	6,64	4,91	0,547		11,4	24,0
T13	151	302	2	152	14,74	0	0		0	0
T21	151	302	2	152	5,53	5,05	0,834		18,6	29,1
T22	151	302	2	152	8,11	6,78	0,699		17,8	24,8
T23	151	302	2	152	16,58	10,53	0,403		10,4	17,9

Дані табл. 4.3 показують, що адекватними є результати, отримані за обома розглянутими способами інтерполяції. Але порівнюючи їх якість за всіма показниками, можна зазначити що третій підхід має більш стійкий обчислювальний алгоритм, більш наближені результати до теоретичних посилянь, більш гладку поверхню температурних розподілів. Тому для метода, що нами розробляється більш придатним є третій спосіб інтерполяцію, який закладається в його основу.

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

- обчислені статистичні параметри результатів вогневих випробувань, які показали допустиму відтворюваність експериментальних даних і відповідність умов експерименту вимогам діючих стандартів;
- використовуючи дані експерименту була виконана інтерполяція за трьома розробленими способами, у ході якої було з'ясовано, що найбільш надійними є алгоритми першого та третього способів, тоді як другий спосіб дає нефізичні результати;
- була проведена оцінка адекватності результатів інтерполяції за критерієм Фішера, яка показала що отримані результати є адекватними і для першого і для другого способів, оскільки в жодному з випадків розрахований критерій Фішера не перевищив табличного значення;
- в результаті аналізу ефективності способів інтерполяції за надійністю алгоритму, адекватністю результатів, наближеністю розподілів температур до теоретичних уявлень, а також гладкістю отриманих поверхонь температурних розподілень з'ясовано що найбільш ефективним є третій спосіб інтерполяції, що взятий за основу розроблюваного методу.

РОЗДІЛ 5

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН

5.1. Обґрунтування методу вирішення міцнісної задачі для оцінки вогнестійкості залізобетонної колони

Для визначення межі вогнестійкості за розробленим методом необхідно скористатися схемою, яка показана на рис. 5.1.

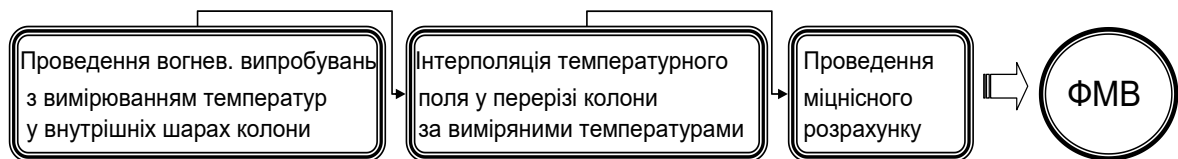


Рис. 5.1. Схема здійснення оцінки вогнестійкості за допомогою інтерпретації результатів вогневих випробувань.

При визначених температурних розподілах шляхом інтерполяції необхідно вирішити міцнісну задачу. Для розв'язку міцнісної задачі потрібно вибрати відповідний розрахунковий метод. Кожний метод спирається на комплекс математичних моделей, які описують його властивості та поведінку в умовах комбінованої дії механічного та температурного впливів. Крім цього, необхідно врахувати умови закріплення, а також тип та умови прикладання діючого навантаження. Нами пропонується в якості робочого розрахункового метода використовувати алгоритм, який міститься у рекомендаціях частини другої Eurocode 2 [38] у додатку В пункт В3. Даний метод вибраний з огляду на те, що він дозволяє врахувати нерівномірність прогрівання по перерізу колони, нелінійність термомеханічних властивостей компонентів залізобетону, геометричну нелінійність. При цьому даний метод є достатньо простим для його реалізації у вигляді програмного забезпечення при автоматичній обробці результатів вогневих випробувань.

Згідно з рекомендаціями даного метода розрахунок проводиться у такій послідовності.

Спочатку обчислюються температурні розподіли із побудуванням ліній ізотерм. Потім переріз розбивається на зони з приблизно однаковою температурою за побудованими лініями ізотерм, як показано на рис. 5.2.

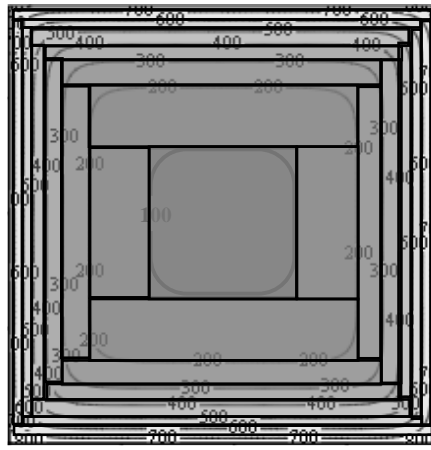


Рис. 5.2. Схема розбиття перерізу залізобетонної колони на зони з однаковою температурою

Для подальшого розрахунку визначається площа A_{sij} і координати $x_{ij}y_{ij}$ центра кожної зони. Використовуючи діаграми деформування бетону й арматурної сталі для кожної хвилини випробування будується графіки залежності моменту у поперечному перерізі та залежності моменту поздовжньої сили від радіуса кривизни нейтральної лінії колони, як показано на рис. 5.3. Графік будується при вирішенні системи рівнянь (1.19).

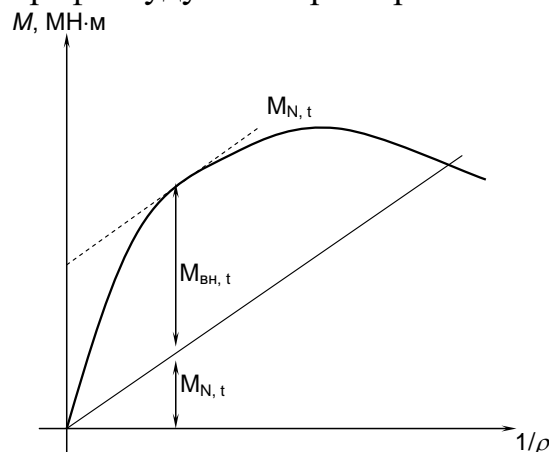


Рис. 5.3. Схема визначення моментів при розрахунку колони.

В кожний контрольний момент часу перевіряється умова

$$M_{вн, T} > N \cdot e_0, \quad (5.1)$$

де e_0 – ексцентриситет прикладеного навантаження відповідно до розрахункової схеми.

Якщо умова не виконується це означає, що настає межа вогнестійкості.

Момент від зовнішнього навантаження будується при використанні формули:

$$M_{N, T} = N \cdot (1/\rho) \cdot l_0 \cdot c^{-1}, \quad (5.2)$$

де $l_0 = \mu \cdot l$ – приведена довжина колони (μ – коефіцієнт закріплення, l – довжина колони);

$c = 10$ – числовий параметр, що характеризує жорсткість системи.

Для описання термомеханічних властивостей бетону та арматурної сталі були застосовані стандартні діаграми, які описуються формулами табл. 1.5 строка 2. Вигляд діаграм поданий на рис. 5.4. та рис. 5.5.

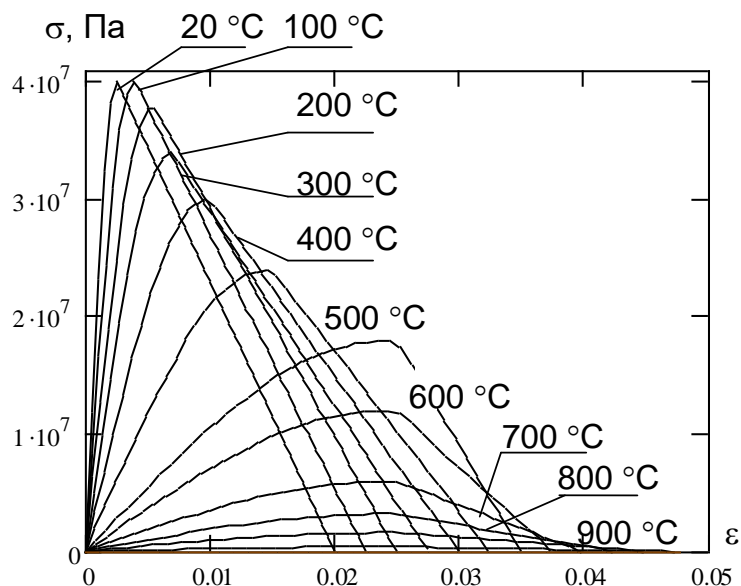


Рис. 5.4. Діаграми деформування бетону С 40/45 колон-зразків.

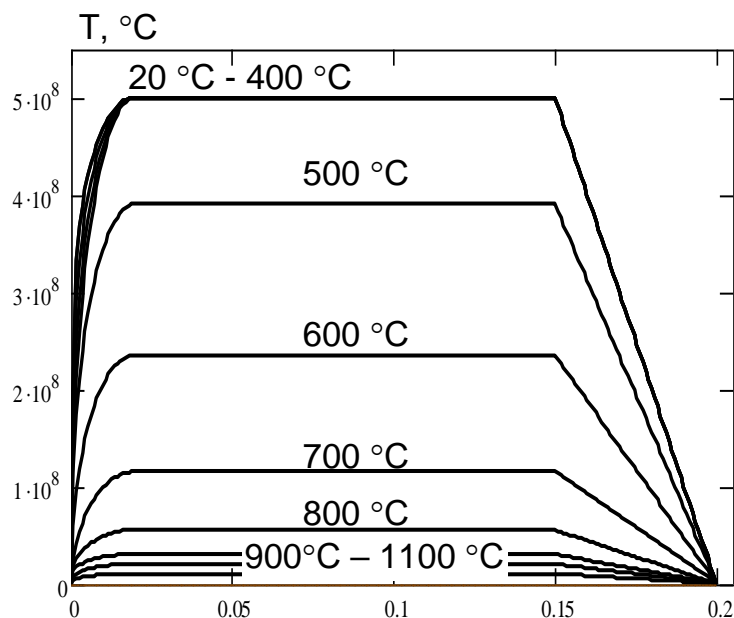


Рис. 5.5. Діаграми деформування арматурної сталі колон-зразків.

На рис. 5.6 представлена блок-схема для побудування графіку моменту у залежності від кривизни нейтральної лінії колони

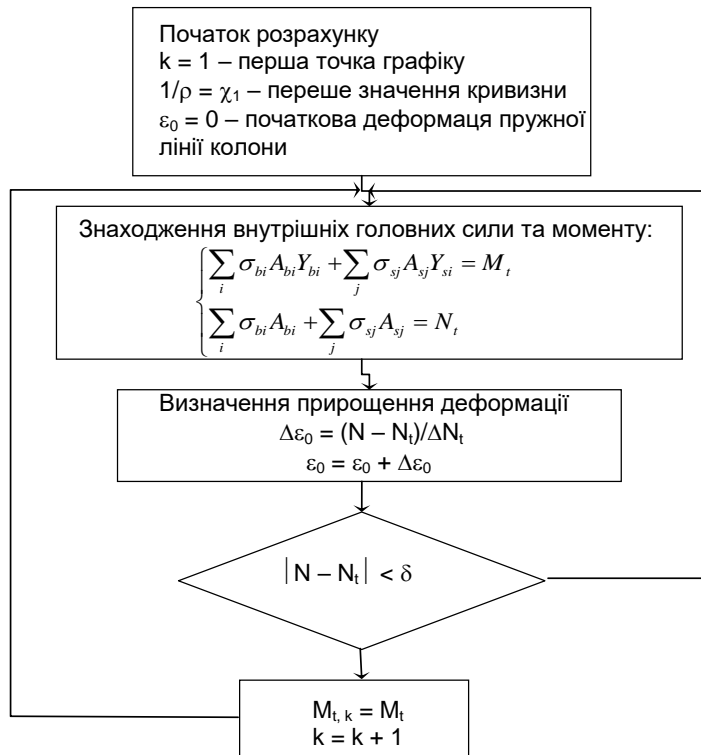


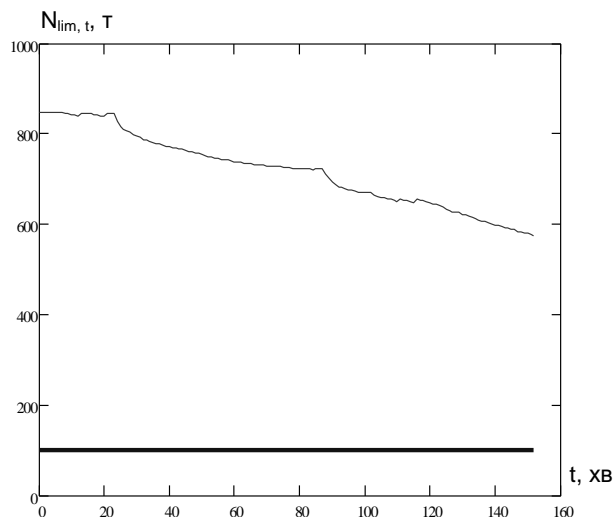
Рис. 5.6. Блок-схема побудовання графіку головного моменту у переріз колони.

Для зручності визначення межі вогнестійкості випробуваних колон графік на рис. 5.4 перетворюється на графік несучої здатності за формулою:

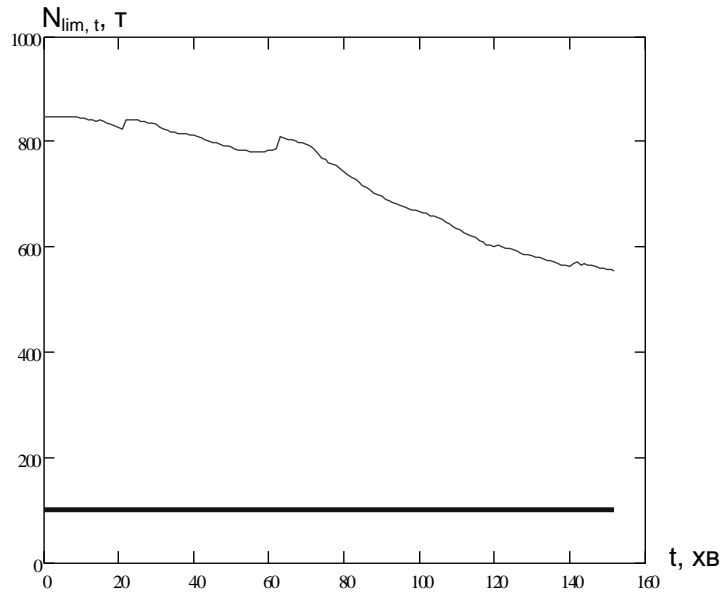
$$N_{lim, t} = M_{вн, t}/e_n, \quad (5.3)$$

де $e_n = \mu^2 l^2 / \pi^2$ – ексцентриситет поздовжньої сили.

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



a.



б.

Рис. 5.7 Несуча здатність колони-зразка №1 (а) і колони-зразка №2 (б).

На графіках рис. 5.6 також показано значення діючої поздовжньої сили, при порівнянні з якою встановлюється настання граничного стану втрати несучої здатності. За графіками рис. 5.6 встановлюється, що межа вогнестійкості за несучою здатності протягом контрольного періоду часу 150 хв. не настає і колона може відповідати вимогам до будівель за I ступенем вогнестійкості (R 150).

Результати проведеного розрахунку показали, що розроблений алгоритм є стійким і може ефективно застосовуватися для удосконаленого методу випробувань залізобетонних колон на вогнестійкість.

5.2. Алгоритм удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон квадратного перерізу

З огляду на проведенні дослідження був розроблений алгоритм удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон квадратного перерізу, блок-схема якого приведена на рис. 5.8.

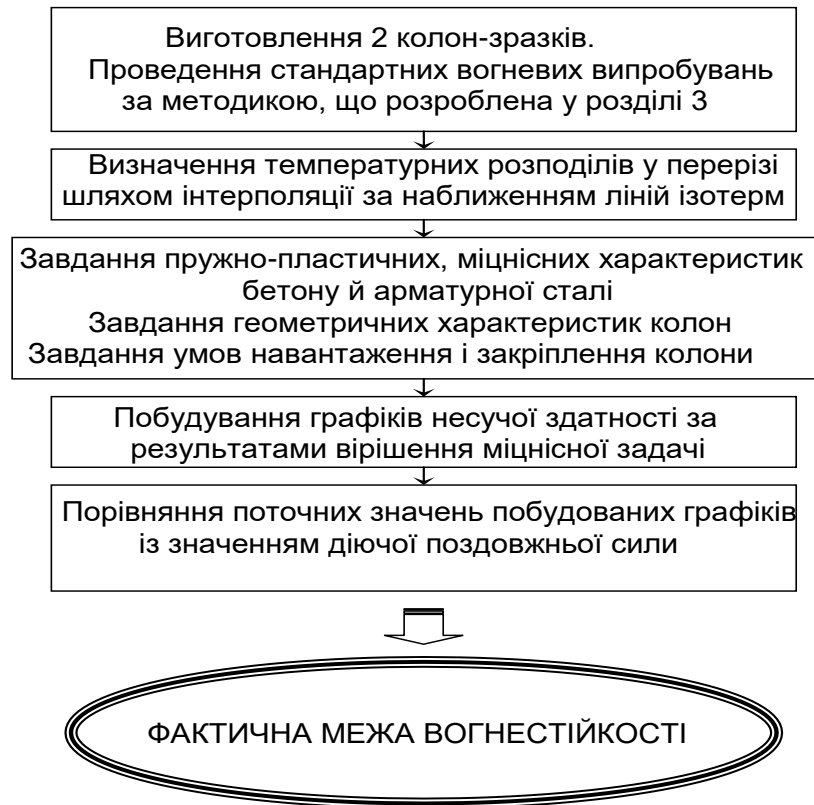


Рис. 5.8. Алгоритм визначення межі вогнестійкості за удосконаленим методом випробувань залізобетонних колон квадратного перерізу

5.3. Оцінка адекватності результатів оцінки вогнестійкості залізобетонних колон за удосконаленим методом

Для оцінки адекватності результатів, які отримуються за удосконаленим методом випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон квадратного перерізу були використані результати експериментальних досліджень монографії А.Ф. Мілованова [11]. Для перевірки адекватності були розглянуті колони перерізом 300×300, параметри яких подані у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Технічні характеристики залізобетонних колон-зразків для випробувань

Позначення колони згідно з ПП	Захисний шар бетону w , мм	Дані щодо бетону		Дані щодо арматури	
		Тип	Клас міцності	Клас міцності	Діаметр d , мм
К-1	25	Керамзитобетон	LC20/22	A400C	18
К-2	25	Керамзитобетон	LC20/25	A400C	25
К-3	29,7	Високоміцний бетон	C45/50	A400C	12
К-4	31	Високоміцний бетон	C55/60	A400C	12
К-5	31	Високоміцний бетон	C60/75	A400C	12

На рис. 5.9 подана схема перерізу колон

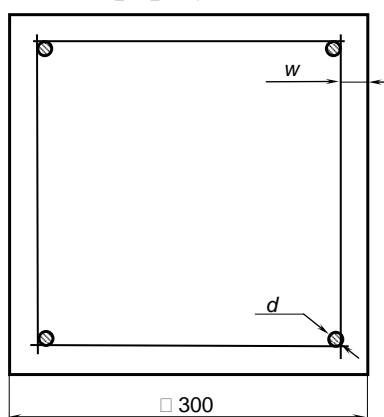


Рис. 5.9. Схема перерізу залізобетонних колон

Для поданих в [11] даних щодо температури прогрівання випробуваних колон було виконано відновлення температурних полів за 3 способом інтерполяції, результати якої можна побачити на рис. 5.10.

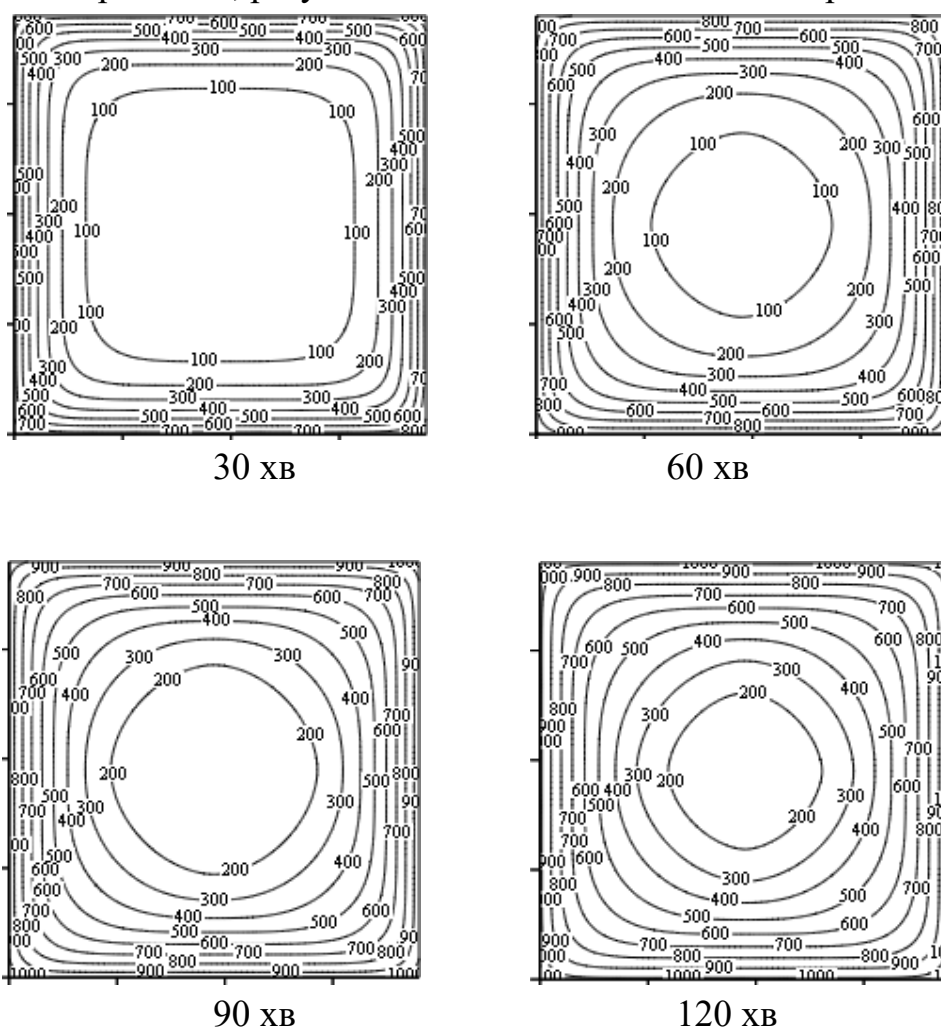


Рис. 5.10. Температурні розподілення колони К-1, отримані шляхом інтерполяції.

На рис. 5.10 показані результати вирішення міцнісної задачі. Отримані результати показують високу їх відповідність до результатів експерименту.

В табл. 5.2 показані дані, отримані для інших колон згідно з табл. 5.1. Ці дані показують те, що їх похибка складає не більше 15 %. Таке значення похибки показує високу ефективність удосконаленого метода.

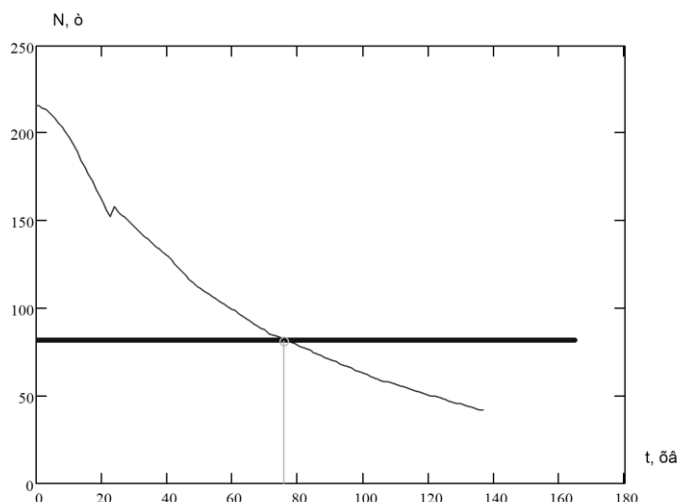


Рис. 5.11. Визначення вогнестійкості колони К-1 [11] за удосконаленим методом.

Таблиця 5.2

Вогнестійкість залізобетонних колон-зразків для випробувань

Позначення колони згідно з [11]	Захисний шар бетону w , мм	Відхилення температури середини колони, %	Межа вогнестійкості, отримана експериментально,	Розрахункова межа вогнестійкості, хв	Відносне відхилення, %	Середнє відхилення, %
К-1	25	7	89	76	14,6	7,66
К-2	25	8	107	95	11,2	
К-3	29,7	7	85	91	6,6	
К-4	31	5	95	93	3,2	
К-5	31	6	110	113	2,7	

Проведені дослідження дали змогу розробити програмне забезпечення, для визначення межі за результатами проведених вогневих випробувань. На рис. 5.12 приведена сторінка вводу початкових даних, а на рис. 5.13 сторінка виводу результатів.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Показание термометра		Горизонталь		Вертикаль		Арматура		Стойка бетона		Стойка арматуры		Кольцо арматурных стержней		Геометрические размеры		Расчетная схема						
Т00, °С	Т01, °С	Т02, °С	Т03, °С	Т11, °С	Т12, °С	Т13, °С	Т21, °С	Т22, °С	Т23, °С	Ист. °С	Класс прочности	Тип	Диаметр, d, м	Горизонталь	Вертикаль	Ширина, b, м	Высота, в, м	Длина, L, м	Толщина защитного слоя, m, мм	Коэффициент затрлплен	Прс	
20.2	20.2	20.2	21.857	20.2	20.926	20.2	20.2	20.2	20.2	20.208	С 20/25		0.02	3	2	0.4	0.3	2.5	0.04	0.7	сил	
5	20.2	20.2	20.2	24.747	20.2	22.204	20.2	20.2	20.2	22.757												
6	20.2	20.2	20.2	28.911	20.2	24.068	20.2	20.2	20.2	25.075												
7	20.2	20.2	20.2	34.182	20.2	26.467	20.2	20.2	20.2	27.969												
8	20.2	20.2	20.2	40.41	20.2	29.312	20.2	20.2	20.2	31.409												
9	20.2	20.2	20.2	47.468	20.2	32.691	20.2	20.2	20.2	35.281												
10	20.2	20.2	20.2	55.247	20.2	36.218	20.2	20.2	20.2	39.483												
11	20.2	20.2	20.2	63.656	20.2	40.185	20.2	20.2	20.2	44.023												
12	20.2	20.2	20.2	72.616	20.2	44.446	20.2	20.2	20.2	48.841												
13	20.2	20.2	20.2	82.061	20.2	48.971	20.2	20.2	20.2	53.901												
14	20.2	20.2	20.2	93.13	20.2	53.9175	20.2	20.2	20.2	59.14												
15	20.2	20.2	20.2	102.98	20.2	59.229	20.2	20.2	20.2	64.717												
16	20.2	20.2	20.2	113.27	20.2	65.185	20.2	20.2	20.2	70.621												
17	20.2	20.2	20.2	124.826	20.2	71.422	20.2	20.2	20.2	76.856												
18	20.2	20.2	20.2	137.66	20.2	78.068	20.2	20.2	20.2	83.581												
19	20.2	20.2	20.2	151.843	20.2	85.191	20.2	20.2	20.2	90.806												
20	20.2	20.2	20.2	167.407	20.2	92.816	20.2	20.2	20.2	98.531												
21	20.2	20.2	20.2	184.31	20.2	101.041	20.2	20.2	20.2	106.756												
22	20.2	20.2	20.2	202.596	20.2	109.866	20.2	20.2	20.2	115.581												
23	20.2	20.2	20.2	222.181	20.2	119.291	20.2	20.2	20.2	125.006												
24	20.2	20.2	20.2	243.216	20.2	129.316	20.2	20.2	20.2	135.431												
25	20.2	20.2	20.2	265.751	20.2	139.741	20.2	20.2	20.2	146.856												
26	20.2	20.2	20.2	290.886	20.2	151.166	20.2	20.2	20.2	159.281												
27	20.2	20.2	20.2	318.621	20.2	163.591	20.2	20.2	20.2	172.706												
28	20.2	20.2	20.2	349.056	20.2	177.016	20.2	20.2	20.2	187.131												
29	20.2	20.2	20.2	382.291	20.2	191.441	20.2	20.2	20.2	202.556												
30	20.2	20.2	20.2	418.526	20.2	206.866	20.2	20.2	20.2	218.981												
31	20.2	20.2	20.2	467.761	20.2	224.291	20.2	20.2	20.2	236.406												
32	20.2	20.2	20.2	520.996	20.2	243.716	20.2	20.2	20.2	255.831												
33	20.2	20.2	20.2	579.231	20.2	265.141	20.2	20.2	20.2	277.256												
34	20.2	20.2	20.2	643.466	20.2	288.566	20.2	20.2	20.2	300.681												
35	20.2	20.2	20.2	714.701	20.2	314.991	20.2	20.2	20.2	326.106												
36	20.2	20.2	20.2	794.936	20.2	344.416	20.2	20.2	20.2	354.531												
37	20.2	20.2	20.2	885.171	20.2	377.841	20.2	20.2	20.2	386.956												
38	20.2	20.2	20.2	987.406	20.2	416.266	20.2	20.2	20.2	423.381												
39	20.2	20.2	20.2	1102.641	20.2	460.691	20.2	20.2	20.2	474.806												
40	20.2	20.2	20.2	1231.876	20.2	512.116	20.2	20.2	20.2	531.231												
41	20.2	20.2	20.2	1376.111	20.2	572.541	20.2	20.2	20.2	593.656												
42	20.2	20.2	20.2	1536.346	20.2	642.966	20.2	20.2	20.2	662.081												
43	20.2	20.2	20.2	1713.581	20.2	723.391	20.2	20.2	20.2	747.506												
44	20.2	20.2	20.2	1908.816	20.2	816.816	20.2	20.2	20.2	849.931												
45	20.2	20.2	20.2	2123.051	20.2	924.241	20.2	20.2	20.2	969.356												
46	20.2	20.2	20.2	2357.286	20.2	1047.666	20.2	20.2	20.2	1097.781												
47	20.2	20.2	20.2	2612.521	20.2	1188.091	20.2	20.2	20.2	1250.206												
48	20.2	20.2	20.2	2889.756	20.2	1346.516	20.2	20.2	20.2	1416.631												
49	20.2	20.2	20.2	3190.991	20.2	1524.941	20.2	20.2	20.2	1597.056												
50	20.2	20.2	20.2	3518.226	20.2	1725.366	20.2	20.2	20.2	1791.481												
51	20.2	20.2	20.2	3873.461	20.2	1949.791	20.2	20.2	20.2	1999.906												
52	20.2	20.2	20.2	4256.696	20.2	2199.216	20.2	20.2	20.2	2223.331												
53	20.2	20.2	20.2	4668.931	20.2	2474.641	20.2	20.2	20.2	2472.756												
54	20.2	20.2	20.2	5111.166	20.2	2778.066	20.2	20.2	20.2	2748.181												
55	20.2	20.2	20.2	5594.401	20.2	3102.491	20.2	20.2	20.2	3052.606												

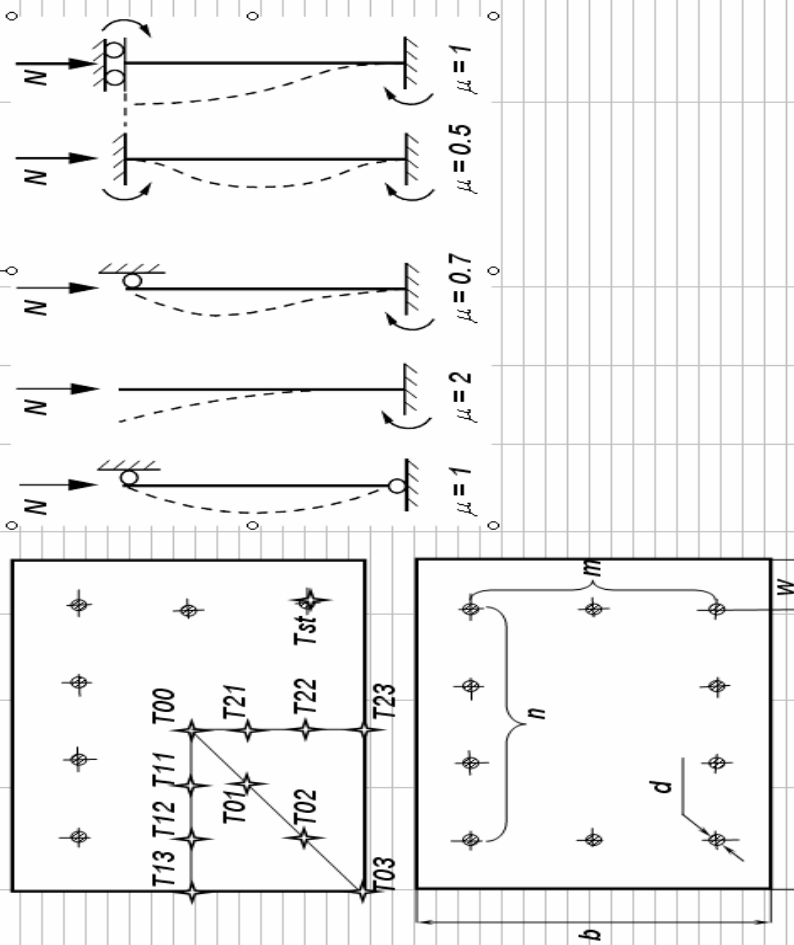


Рис. 5.12. Сторінка вводу початкових даних розробленого програмного забезпечення

Предел огнестойкости колонны ФПО = "Предел огнестойкости не достигнут"

Ресурс несущей способности колонны RSC = 29.621 %

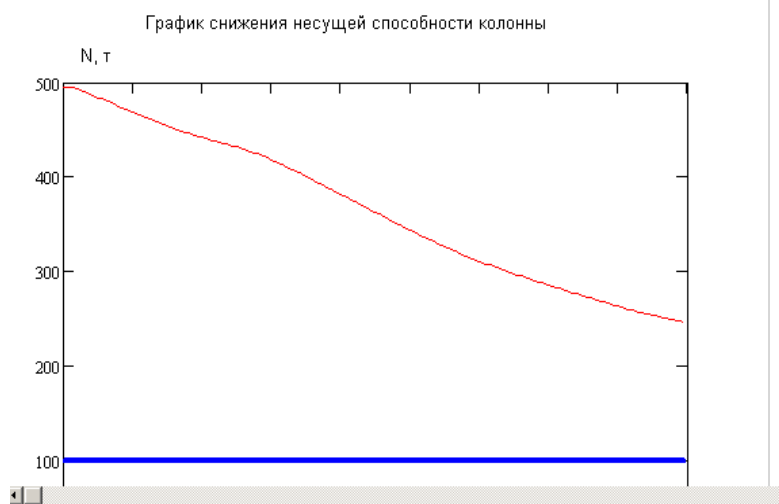


Рис. 5.13. Сторінка виводу результатів розробленого програмного забезпечення

5.4. Оцінка ефективності удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон квадратного перерізу

Оцінку ефективності удосконаленого методу можна провести, спираючись на його порівняльні дані по відношенню до існуючих методів. Основними критеріями, що визначають ефективність методів, є їх трудомісткість, енергоємність, матеріаломісткість, вартість, а також точність, відтворність і достовірність одержуваних результатів.

Таблиця 5.3

Основні масові показники устаткування стандартних випробувань залізобетонних колон на вогнестійкість

№, п/п	Устаткування	Маса, кг
1	Система закріплення і навантаження:	
	• фундамент і несуча рама	4850
	• привод	720
	• система закріплення	3210
	• вимірювальна система	30
	Сумарна маса системи закріплення і навантаження –	8810
2	Нагрівальна піч:	
	• огорожувальні споруди	5100
	• футеровка	3150
	• форсунки	40
	• несуча система печі	520
	• вага димовидаляючих комунікацій	310

	Сумарна маса пічного устаткування	9120
3	Допоміжне устаткування:	
	• термопари	25
	• комп'ютерна система	70
	Сумарна маса допоміжного устаткування	95
4	Зразки – з\б колони 3.5 м перерізом 500×500	4025
5	Приведена маса устаткування	22050

Серед критеріїв, які комплексно можуть охарактеризувати трудомісткість, енергоємність, матеріаломісткість, вартість методу, можна виділити приведену масу. Даний показник складається з величини маси основного і допоміжного устаткування, що характеризує його вартість, складність налагодження і трудомісткість проведення вимірювань, середньої маси зразків, що показує трудомісткість, енергоємність їх випробувань і вартість їх виготовлення. Основні масові показники представлені в табл. 5.3

Приведена маса устаткування обґрунтованого розрахунково-експериментального методу відображена в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

**Основні масові показники устаткування
удосконаленого методу випробувань залізобетонних колон**

№, п/п	Устаткування	Маса, кг
1	Нагрівальна піч:	
	• огорожувальні споруди	5100
	• футеровка	3150
	• форсунки	40
	• несуча система печі	520
	• вага димовидаляючих комунікацій	310
	Сумарна маса пічного устаткування	9120
2	Допоміжне устаткування:	
	• термопари	25
	• комп'ютерна система	70
	Сумарна маса допоміжного устаткування	95
3	Зразки – з\б колони 3.5 м перерізом 500×500	4025
4	Приведена маса устаткування	13240

Порівнюючи дані табл. 5.3 і табл. 5.4, можна прийти до висновку, що удосконалений метод має більш низьку трудомісткість, енергоємність, матеріаломісткість та вартість, оскільки приведена маса обладнання для його реалізації на 40 % менше за приведену масу існуючого методу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.
3. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / Ройтман В.М. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». 2001. – 382 с.
4. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
5. 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.
6. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром : – М.: Стройиздат, 1987. – 80 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. Милованов А.Ф. Расчет жаростойких железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1975. – 128 с.
10. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.
11. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
12. Милованов А.Ф. Огнесохранность железобетонных конструкций после пожара / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 2005. – 120 с.
13. Соломин В.М. Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций / Соломин В.М. – М.: Машиностроение, 1980. – 128 с.
14. Ильин Н.А. Техническая экспертиза зданий, поврежденных пожаром / Ильин Н.А. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
15. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции / Ильин Н.А. – М.: Стройиздат, 1979. – 128 с.
16. Яковлев А.И. Огнестойкость железобетонных конструкций / Яковлев А.И. // Пожарная профилактика и тушение пожаров : [информац. сб. ВНИИПО]. – М.: Стройиздат, 1970. – № 6. – С. 18–26.
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. Fischer R. Uber Verhalten von Entmörtel und beton bei höheren temperaturen. Berlin, 1970, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. – P. 214.
19. Fischer R., Welgler H. Beton bei temperaturen von 100 bis 750 °C, Darmstadt, 1967. – P. 283.
20. Lea F.C. Comportement du beton entre 80 et 300 °C, 1976, № 18. – P. 136.
21. Gerhardt H. Design Method of Smoke and Heat exhaust Systems in construction Works. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 127–140.
22. Kowalski R., Górska B. Badanie zmian strukturalnych betonu narażonego na działanie wysokich temperatur. Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 315–322.
23. Lie T.T. Characteristic temperature curves for various fire severities. "Fire Technol", 1974, 10, № 4. – P. 315–326.
24. 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.
25. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 141–150.
26. Harmathy T.Z. Fire resistance versus flame spread resistance. – Fire Technol., 1976, v. 12, N 4. – P. 290–302.
27. 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.
28. 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.
29. Стрельчук Н.А. Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве / Стрельчук Н.А. – М.: Стройиздат, 1970. – 128 с.
30. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве : [2-е изд., перераб. и доп.] / Ройтман М.Я. – М.: Стройиздат, 1985. – 596 с.
31. Романенков И.Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов / Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. -М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.
32. 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).
33. 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).

34. 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).
35. 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)
36. ISO 834-75 Fire resistance test. Elements of building constructions. European Committee for Standardization, Brussels, 2000.
37. EN 13501-1:2002 “Fire classification of construction products and building elements” – Part 1.2. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
38. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
39. 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).
40. 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).
41. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход) / Круковский П.Г. – К.: НАНУ Институт технической теплофизики, 1998. – 224 с.
42. 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.
43. 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.
44. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия / Кричевский А.П. – М.: Стройиздат, 1984. – 148 с.
45. Яковлев А.И. Пожарная профилактика / Яковлев А.И., Сорокин А.Н. – М.: ВНИПО. – 1979. – Вып. 7. – С. 37–41.
46. 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.
47. 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.

48.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.

49.Фомин С.Л. Работа 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.

50.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.

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

52.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.

53.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.

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

55.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.

56.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.

57.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.

58.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.

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

60. 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.

61. 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.

62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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

71. 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.

72. 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.

73. 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.

74. 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.

75. 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.

76. 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.

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

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

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

80. 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.

81. 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.

82. 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.

83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. 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.

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

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

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

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

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

95. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad : [учебн. курс] / Макаров Е.Г. – СПб: Питер, 2003. – 448 с.
96. Соппротивление 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.
97. Бахвалов Н.С. Численные методы / Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. – М.: Высшая школа, 1991. – 630 с.
98. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Карпенко Н.И. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
99. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона : [монография] / Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. – Одесса: ОНМУ, 2007. – 110 с.
100. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / Перельмутер А.В., Сливкер В.И. – К.: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.
101. 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.
102. 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.
103. 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.
104. 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.
105. 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.
106. Жуков В.В. Термостойкость железобетонных конструкций / Жуков В.В., Панюков Э.Ф. – К.: Будівельник, 1991. – 224 с.
107. Пат. 85695 Україна, МПК(2009) G01 N 33/38. Спосіб визначення несучої здатності стиснутих елементів залізобетонних конструкцій в умовах пожежі / Поздєєв С.В., Некора О.В., Вітько М.М., Поздєєв А.В., заявник і

патентовласник Поздеев С.В. - №а200607816 ; заявл. 12.07.06 ; опубл. 25.02.09, Бюл. №4, 2009 р.

108. 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.

109. 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.

110. 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.

111. 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.

112. 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.

113. Поздеев С.В. Метод интерпретации данных огневых испытаний железобетонных колонн для расчетной оценки их огнестойкости / С.В. Поздеев, В.К. Словінський, С.Д. Щіпець, 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

Словінський Віталій Казимирович
Поздєєв Сергій Валерійович
Щіпець Станіслав Дмитрович

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВОГНЕСТІЙКОСТІ
ЗАЛІЗОБЕТЕННИХ КОЛОН**

монографія

Підписано до друку 27 листопада 2015 року. Формат 60×90 1/16. папір офсетний.

Офсетний друк. Ум. Друк. Арк. 5,25. Тираж 300 прим. Зам. № 15

Віддруковано у відділі РВР ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
вул.Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034.