

**Черкаський інститут пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України**

**ТИЩЕНКО О. М., ШВИДЕНКО А. В., ПОЗДЄЄВ С. В.,
НУЯНЗІН В. М., НОВГОРОДЧЕНКО А. Ю.**

ВПЛИВ МОДИФІКАТОРІВ БЕТОНУ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Монографія

Черкаси - 2018

УДК: 614.841.332

Рецензенти:

Кириченко О. В., доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри пожежно-профілактичної роботи Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України;

Ніжник В. В., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного центру технічного регулювання Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту.

Вплив модифікаторів бетону на вогнестійкість залізобетонних конструкцій : [монографія] / О. М. Тищенко, А. В. Швиденко, С. В. Поздєєв, В. М. Нуянзін, А. Ю. Новгородченко – Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018 – 108 с.

У виробництві бетону та залізобетону є економічно і практично обґрунтованим застосування добавок-модифікаторів, які впливають на його властивості, в тому числі і на вогнестійкість. Вогнестійкість залізобетонних конструкцій визначають експериментальними, експериментально-розрахунковими та розрахунковими методами. Кожен з цих методів із притаманними їм перевагами і недоліками має свою сферу застосування.

В монографії розглянуті і встановлені такі аспекти: вогнестійкість залізобетонних балок погіршується у разі введення модифікаторів, які покращують рухомість бетонної суміші та стійкість бетонів до низьких температур. Значення меж вогнестійкості за критерієм максимального прогину балок, виготовлених з бетону із вмістом суперпластифікаторів або протиморозних добавок-модифікаторів, зменшується на 8 та 3 хвилини відповідно порівняно із значенням для балок на основі немодифікованого бетону.

Таким чином розкриття особливостей впливу модифікаторів бетону на вогнестійкість залізобетонних балок, як підґрунтя удосконалення розрахункових методів її визначення, є актуальною науково-технічною задачею, розв'язання якої створює передумови поширення їх застосування у сфері пожежної безпеки.

Ухвалено на засіданні Вченої ради Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.

Протокол № 1 від 12 жовтня 2018 року.

УДК: 614.841.332

© ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля, 2018

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ I	
ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	7
1.1. Нормування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій	7
1.2. Властивості залізобетону при його нагріванні в умовах пожежі	11
1.2.1. Властивості бетону в умовах нагріву під час пожежі.....	11
1.2.2. Властивості арматурної сталі в умовах нагріву під час пожежі.....	15
1.3. Вплив модифікаторів на властивості залізобетону при нагріванні	16
1.3.1. Класифікація модифікаторів складів бетонів.....	16
1.3.2. Вплив модифікаторів бетону на поведінку залізобетонних конструкцій в умовах пожежі.....	17
1.4. Методи визначення фактичних меж вогнестійкості	18
1.5. Математичні моделі поведінки залізобетону при пожежі	23
1.5.1. Математичні моделі теплообміну в залізобетонних конструкціях в умовах пожежі.....	24
1.5.2. Математичні моделі напружено-деформованого стану в залізобетонних конструкціях в умовах пожежі.....	28
1.5.3. Математичний опис поведінки залізобетонних конструкцій в умовах пожежі для експериментально-розрахункових методів.....	34
РОЗДІЛ II	
ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ	35
2.1. Експериментальне обладнання	35
2.1.1. Устаткування і матеріали для виготовлення зразків.....	35
2.1.2. Устаткування для дослідження фізичних параметрів зразків до, під час і після нагрівання.....	35
2.1.3. Устаткування для дослідження структури зразків.....	36
2.2. Методика виготовлення бетонних зразків	37
2.3. Методика попередніх досліджень властивостей бетону	40
2.4. Методика дослідження нагріву зразків без навантаження	41
2.5. Методика дослідження нагріву зразків під навантаженням	44
2.5.1. Методика випробувань кубічних зразків.....	44
2.5.2. Методика випробувань циліндричних зразків.....	47
2.5.3. Методика реалізації теплових режимів нагріву зразків.....	49

РОЗДІЛ III	
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАТОРІВ НА ПОВЕДІНКУ БЕТОНУ ПРИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ НАГРІВУ	51
3.1. Попередні дослідження механічних властивостей бетонних зразків.	51
3.2. Попередні дослідження структурних властивостей бетонних зразків.	52
3.3. Дослідження властивостей модифікованого бетону при його нагріванні без навантаження при лабораторних випробуваннях.	54
3.4. Дослідження властивостей модифікованого бетону при його нагріванні без навантаження при вогневих випробуваннях	58
3.5. Дослідження теплофізичних властивостей модифікованого бетону.	60
<i>3.5.1. Математичне забезпечення для ідентифікації теплофізичних властивостей модифікованого бетону.</i>	<i>60</i>
<i>3.5.2. Результати ідентифікації теплофізичних характеристик модифікованого бетону.</i>	<i>65</i>
3.6. Дослідження впливу модифікаторів бетону на швидкість прогрівання залізобетонної балки	68
РОЗДІЛ IV	
РЕЗУЛЬТАТИ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ БЕТОННИХ ЗРАЗКІВ	75
4.1. Механічні випробування кубічних зразків з модифікованого бетону в нагрітому стані.	75
4.2. Механічні випробування циліндричних зразків з модифікованого бетону в нагрітому стані.	81
РОЗДІЛ V	
УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАТОРІВ БЕТОНУ ПРИ РОЗРАХУНКОВОМУ ВИЗНАЧЕННІ МЕЖ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК.....	89
5.1. Математичне забезпечення для визначення межі вогнестійкості залізобетонних балок за результатами випробувань бетону.	89
<i>5.1.1. Математичний опис діаграм деформування бетону.....</i>	<i>91</i>
<i>5.1.2. Математична модель залізобетонної балки для проведення розрахунку межі вогнестійкості.....</i>	<i>93</i>
<i>5.1.3. Результати розрахунку межі вогнестійкості залізобетонної балки з модифікованого бетону.</i>	<i>95</i>
5.2. Дослідження адекватності отриманих результатів визначення меж вогнестійкості залізобетонної балки з модифікованого бетону.	97
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	106

ВСТУП

Статистичні дані по Україні показують, що в 16 випадках пожеж із 100 з'являється додатковий збиток, пов'язаний з обваленням конструкцій. При цьому 3/4 будівель виконані з залізобетонних несучих конструкцій, що зводяться за допомогою нових технологій будівництва і виробництва бетону та арматурної сталі.

На сучасному етапі розвитку будівництва при виготовленні бетонного розчину все частіше використовуються різноманітні домішки, які покращують властивості і якості бетону. Модифікація бетонів і будівельних розчинів виконується з метою зменшення витрати цементу; регуляції рухливості бетонної суміші на різних технологічних етапах зведення конструкцій; управління швидкістю процесів затвердіння і тепловиділення, а також для поліпшення багатьох інших властивостей. Сучасні ринкові відносини обумовлюють розвиток суттєвої конкуренції серед фірм-виробників добавок до бетонного складу, що стимулює поліпшення якості будівельних конструкцій і зменшення вартості їх виготовлення.

Сучасні тенденції збільшення пожеж та інших надзвичайних ситуацій, які можуть стати причиною пожеж або є їх наслідком, показують важливість завдань вдосконалення розрахунково-випробувальної бази для визначення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. Додатковою обставиною, що обумовлює важливість цих завдань, є відсутність достатньої випробувальної бази в Україні, трудомісткість і висока вартість вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій. При цьому виникає питання врахування впливу технологічної та експлуатаційної спадковості залізобетону для коректного визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, в тому числі виготовлених на основі модифікованого бетону.

Важливими аспектами при вирішенні цих завдань є:

- забезпечення достовірності і надійності одержуваних даних, які підтверджені сучасними уявленнями про поведінку залізобетонних конструкцій, виконаних з модифікованого бетону під впливом факторів пожежі;
- зниження трудовитрат і вартості проведення експериментальних робіт при визначенні вогнестійкості залізобетонних конструкцій, виконаних з модифікованого бетону.

У виробництві бетону та залізобетону економічно і практично обґрунтованим є застосування добавок-модифікаторів, які впливають на його властивості, в тому числі і на вогнестійкість.

Відомо, що вогнестійкість залізобетонних конструкцій визначають експериментальними, експериментально-розрахунковими і

розрахунковими методами. Кожен з цих методів поряд з наявними у них перевагами і недоліками мають свою область застосування.

У роботах Яковлева О. І., Ройтмана В. М., Круковского П. Г., Поздєєва С. В., Новака С. В., Белікова А. С., Жукова В. В., Фоміна С. Л. та ін. викладені та обґрунтовані методика, які застосовуються при визначенні вогнестійкості сучасних залізобетонних конструкцій, в тому числі і залізобетонних балок. Процедури методів увійшли в стандарти і відповідні норми багатьох провідних країн. Однак в цих методах не передбачений облік впливу модифікаторів бетону, що може привести до помилкового визначення вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій, зокрема, балок.

З огляду на вищевикладене, розкриття особливостей впливу модифікаторів бетону на вогнестійкість залізобетонних балок, є підставою для удосконалення розрахункових методів їх визначення, також є актуальною науково-технічною задачею, рішення якої створює передумови їх поширення в сфері пожежної безпеки.

РОЗДІЛ І

ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Нормування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій

Наукове обґрунтування вимог до вогнестійкості будівельних конструкцій є однією з основних задач комплексної проблеми забезпечення пожежної безпеки в будівництві. Як показують статистичні дані, витрати на виконання вимог до вогнестійкості будівлі становлять до 4% від його загальної кошторисної вартості [5].

Згідно [1, 3, 4] основним показником вогнестійкості є межа вогнестійкості елемента конструкції, який визначається часом (у хвиликах) від початку пожежі до настання одного з граничних станів конструкції: втрата несучої здатності (R); втрата цілісності (E); втрата теплоізоляційної здатності (I). Цим показником визначаються ступені вогнестійкості [1], якими класифікуються будівлі і споруди згідно з таблицею 1.1.

Таблиця 1.1.

Конструктивні характеристики будинків залежно від їхніх ступенів вогнестійкості

Ступінь вогнестійкості	Конструктивні характеристики
I, II	Будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з натуральних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону з використанням листових і плиткових негорючих матеріалів
III	Будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з натуральних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону
III а	Будинки переважно з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – з металевих незахищених конструкцій.
III б	Будинки переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – з деревини, підданої вогнезахисній обробці
IV	Будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з деревини або інших горючих матеріалів, захищених від дії вогню та високих температур штукатуркою або іншими листовими, плитковими матеріалами
IV а	Будинки переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – з металевих незахищених конструкцій
V	Будинки, до несучих і огорожувальних конструкцій, яким не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості

Для залізобетонних конструкцій найбільшу важливість має межа вогнестійкості за несучою здатністю. В якості межі вогнестійкості елемента конструкції приймають проміжок часу від початку вогневого впливу до виникнення граничного стану – втрати стійкості або повного руйнування. Згідно [1] значення межі вогнестійкості визначають, використовуючи натурні стандартні випробування на вогнестійкість будівельних конструкцій конкретних видів або за допомогою розрахункових методів.

Розрізняють фактичну і необхідну ступені вогнестійкості будівлі. Під необхідним ступенем вогнестійкості будинку O_n мається на увазі мінімальна ступінь вогнестійкості, якою повинна володіти будівля для задоволення вимог пожежної безпеки. Необхідна ступінь вогнестійкості будівель визначається галузевими або спеціалізованими нормативними документами.

Для нормування необхідних меж вогнестійкості будівельних конструкцій більшості країн [2, 6] ставлять такі умови. Тип конструкції, матеріал, з якого вона виготовлена, не повинні впливати на необхідну межу вогнестійкості $P_{тр}$. Мінімальні межі вогнестійкості встановлюються з урахуванням призначення будівель, поверховості, місткості, категорії виробництва з вибухопожежної небезпеки, наявності автоматичних установок пожежогасіння та інших факторів.

В Україні необхідна межа вогнестійкості визначається відповідно до таблиці 1.2. [1, 2, 7, 12].

Таблиця 1.2.

Необхідна межа вогнестійкості елементів конструкцій будівель

Ступінь вогнестійкості	Типи будівель	Елементи конструкцій	Необхідна межа вогнестійкості (хв.)
I	Висотні громадські, житлові (до 100 м)	Балки (ригелі)	180
		Плити	180
		Ферми, арки, рами	180
I	Виробничі, громадські, житлові (до 16 поверхів)	Балки (ригелі)	60
		Плити	60
		Ферми, арки, рами	30
II	Виробничі, громадські, житлові (до 16 поверхів)	Балки (ригелі)	60
		Плити	45
		Ферми, арки, рами	30
III	Виробничі, громадські (до 5 поверхів), житлові	Балки (ригелі)	60
		Плити	45
		Ферми, арки, рами	не норм.
IIIa	Громадські, (до 5 поверхів) школи, культурно-видовищні установи (в 1 поверх)	Балки (ригелі)	60
		Плити	15
		Ферми, арки, рами	15
IIIб	Громадські, (до 5 поверхів) школи, культурно-видовищні установи (в 1 поверх)	Балки (ригелі)	45
		Плити	45
		Ферми, арки, рами	45
IV	Виробничі, громадські (до 2 поверхів)	Балки (ригелі)	15
		Плити	15
		Ферми, арки, рами	не норм.
IV a	Виробничі, громадські (до 1 поверху)	Балки (ригелі)	15
		Плити	15
		Ферми, арки, рами	15

Фактична ступінь вогнестійкості будівлі O_{ϕ} – це дійсна ступінь вогнестійкості, запроектованого або побудованого будинку, що визначається за результатами експертизи будівельних конструкцій будівель.

Фактична межа вогнестійкості за несучою здатністю визначається часом настання такого стану в перерізі елемента, при якому він не може нести нормативне навантаження і руйнується [1-12]. В даному випадку фактичну межу вогнестійкості можна визначити за схемою, наведеною на рис. 1.1., поширюючи її на всі елементи несучих залізобетонних конструкцій.

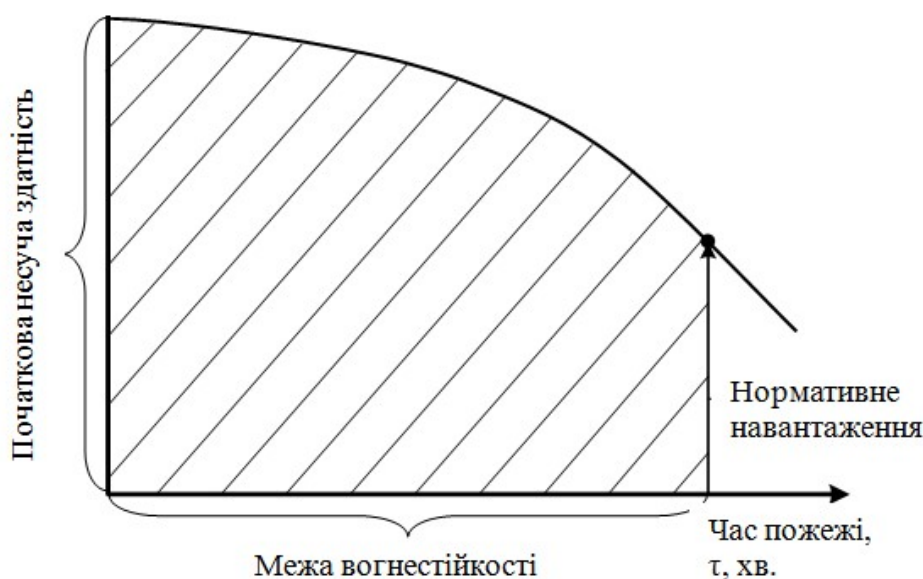


Рис. 1.1 – Втрата несучої здатності стисненого залізобетонного елемента під час пожежі

Відповідність за ступенем вогнестійкості вимогам пожежної безпеки визначається:

$$O_{\phi} = O_n \quad (1.1)$$

Наведену умову безпеки перевіряють шляхом порівняння необхідної межі з фактичною межею вогнестійкості будівельних конструкцій будівлі. У більшості випадків проблема забезпечення вогнестійкості вирішується забезпеченням умови, при якій фактична вогнестійкість повинна бути більшою, ніж необхідна (1.2).

$$P_{\phi} \geq P_n \quad (1.2)$$

де, P_{ϕ} і P_n – відповідно фактичні та необхідні (мінімальні) межі вогнестійкості конструкцій, год.

Методика перевірки відповідності будівельних конструкцій вимогам пожежної безпеки складається з етапів, показаних на рис. 1.2.

Даний підхід до нормування необхідних меж вогнестійкості конструкцій має суттєві недоліки, які полягають у тому, що невірно враховується тривалість пожежі в будинку або споруді, не враховується фактичне пожежне навантаження в приміщеннях, не використовується техніко-економічне обґрунтування необхідних меж вогнестійкості. Це може призвести до встановлення нормативних вимог без достатнього наукового обґрунтування.

Для визначення меж вогнестійкості будівельних конструкцій застосовуються експериментальні та розрахункові методи. [1]

Експериментальні методи ґрунтуються на проведенні випробувань зразків будівельних конструкцій і фрагментів будівельних конструктивних елементів будівель в вогневих печах.

Застосування розрахункових методів для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій в даний час досить обмежена. Основною причиною цього є відсутність надійних відтворюваних методів визначення теплофізичних і механічних характеристик матеріалів будівельних конструкцій в діапазоні температур пожежі. Суть розрахункових методик ґрунтується на розрахунковому визначенні часу, після закінчення якого будівельні конструкції втрачають несучу здатність.

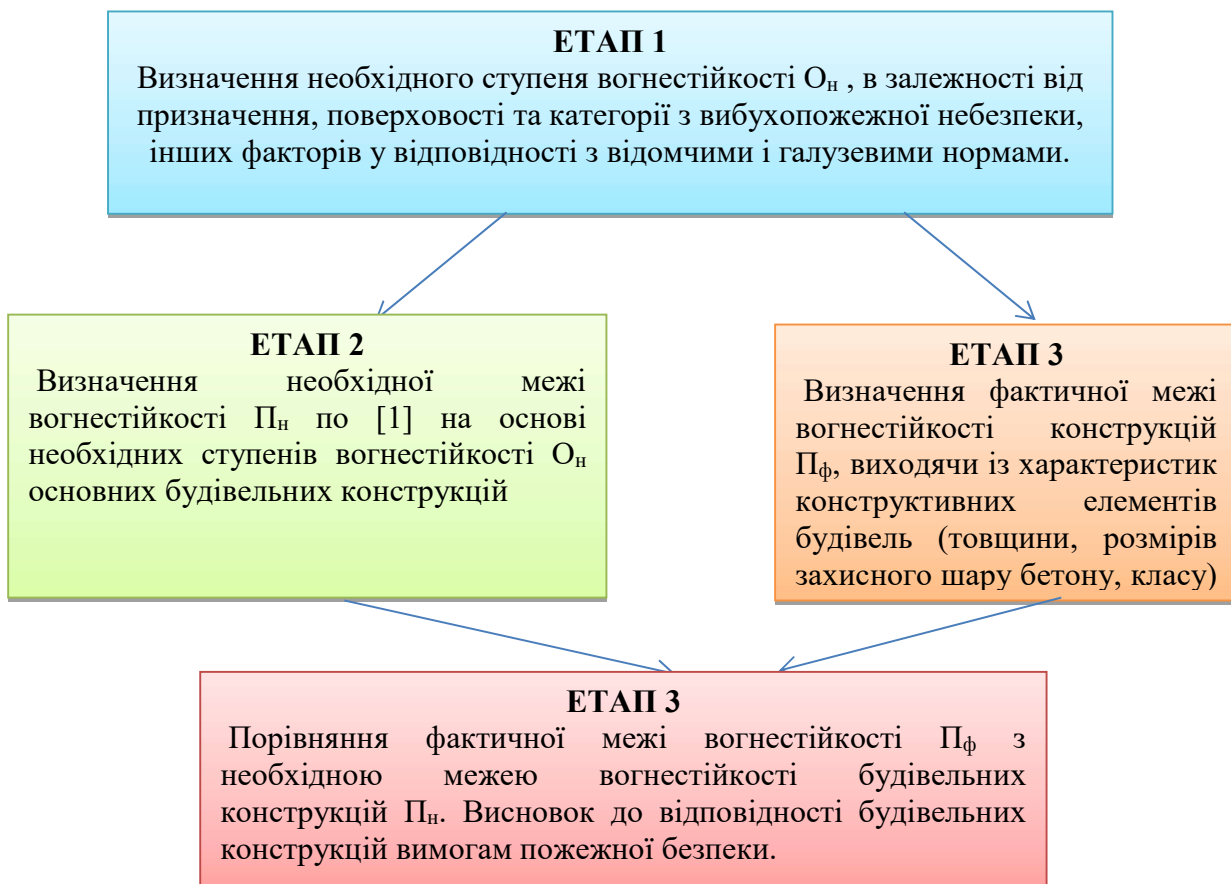


Рис. 1.2 – Методика перевірки відповідності будівельних конструкцій вимогам пожежної безпеки

1.2. Властивості залізобетону при його нагріванні в умовах пожежі

При розгляді структури залізобетону як конструктивного матеріалу, з'ясовується, що він має складний фазовий склад як на макро-, так і на мікрорівні. Це обумовлює його складну поведінку в умовах, які комбінують напружено-деформований стан з дією високої температури, що виникають при дії пожежі на елементи залізобетонних конструкцій. Багато робіт [21-30] присвячено вивченню впливу високотемпературного нагріву на властивості залізобетону, де показано вплив механічних властивостей і структури його складових на міцність під час пожежі. При цьому, виділені основні властивості залізобетону як композиційного матеріалу, що мають вплив на вогнестійкість залізобетонних конструкцій. Структура цих властивостей відображена в табл. 1.3.

Таблиця 1.3.

Властивості залізобетону, які впливають на роботу елемента в умовах пожежі

№ п/п	Властивості	Властивості залізобетона	Вплив температури
1.	міцність з'єднання бетону із арматурою	міцність, жорсткість	впливає
2.	міцність з'єднання розчину з заповнювачем	міцність, жорсткість	впливає
3.	міцність розчину	міцність, жорсткість	впливає
4.	міцність цементного каменю	міцність, жорсткість	впливає
5.	міцність крупного заповнювача	міцність	мало впливає
6.	міцність мілкового заповнювача	міцність	мало впливає
7.	міцність арматури	міцність, жорсткість	впливає
8.	структурний склад	міцність, жорсткість	впливає
9.	фазовий склад	міцність, жорсткість	впливає
10.	хімічний склад	міцність, жорсткість	впливає

1.2.1. Властивості бетону в умовах нагріву під час пожежі

Згідно з даними досліджень [21-30, 38-41] основні особливості властивостей бетону в умовах нагріву можна охарактеризувати даними табл. 1.4.

Таблиця 1.4.

Особливості поведінки бетону в умовах нагріву під час пожежі

Інтервал температур нагріву, °С	Особливості поведінки бетону	Механізм появи даної особливості	Дж.
100-300	Зменшення теплопровідності	Збільшення пористості каркаса і фільтрація вільної вологості в порах бетону	[40]
	Різкий пік теплоємності в інтервалі 100-120 °С		
	Збільшення міцності на стиску	Додаткова гідратація і спікання гідратних зерен	[40]
	Зменшення міцності на розтяг		
	Зменшення модуля пружності	Неоднакове розширення різних шарів внаслідок нерівномірності нагріву, неоднакове терморозширення цементного каменю і заповнювача.	[40]
	Зменшення коефіц. Пуассона		
	Множинне утворення макротріщин		
300-600	Зменшення теплопровідності	Збільшення пористості каркаса	[38]
	Сильне зменшення міцності на стиснення	Неоднакове розширення різних шарів внаслідок нерівномірності нагріву, неоднакове терморозширення цементного каменю і заповнювача.	[40-41]
	Втрата міцності на розтяг		
	Зменшення модуля пружності		
	Збільшення граничних деформацій на стиск		
	Зменшення коефіцієнта терморозширення	Видалення кристалохімічної вологи (дегідратація) і, внаслідок цього, часткове руйнування кристалічного зростка.	
	Зменшення коефіц. Пуассона		
	Множинне утворення мікротріщин		
600-1200	Зменшення теплопровідності	Збільшення пористості каркаса	
	Втрата міцності на стиск	Руйнування кристалогідратної структури внутрішньої поверхні пор і як наслідок нарощування великої кількості внутрішніх мікрodefektів пористого каркасу.	[40]
	Сильне зменшення модуля пружності		
	Велике збільшення граничних деформацій стиснення		
	Зменшення коефіц. Пуассона		
	Утворення сильно вираженої дефектної структури		

Дані табл. 1.4. і дані досліджень [38-41] показують, що в бетоні відбуваються хімічні перетворення, які призводять до зазначених фізичних ефектів. Відповідно до робіт [38-41, 59] основні хімічні перетворення в бетоні при його нагріванні показані в табл. 1.5.

Таблиця 1.5.

Хімічні перетворення в бетоні при його нагріванні в умовах пожежі

Інтервал температур нагріву, °С	Хімічне перетворення	Хімічна реакція
100-300	Виділення вільної і частково кристало-хімічної вологи, яка розчиняє гідроксид кальцію, пересичений його розчин і призводить до додаткової кристалізації гідроксид кальцію при цьому підвищуючи міцність	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} 2\text{SiO}_2 + 3\text{Ca}^{2+} + 6\text{OH}^+ + 4\text{H}_2\text{O},$ $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Ca}^{2+} + 6\text{OH}^+ + 3\text{H}_2\text{O},$ $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4 (31\dots 32)\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 + 3\text{Ca}^{2+} + 6\text{OH}^+ + (29\dots 30)\text{H}_2\text{O}$ $3\text{CaO}\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{Ca}^{2+} + 6\text{OH}^+ + (n - 2)\text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^+ \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$
300-600	Повне видалення вільної вологи і виділення з подальшим видаленням кристало-хімічної вологи з клінкерних зростків, і як результат, їх деструкція на поверхні пористого каркаса	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} 2\text{SiO}_2 + 3\text{CaO}^\uparrow + 6\text{H}_2\text{O}^\uparrow,$ $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO} + 6\text{H}_2\text{O}^\uparrow,$ $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4 (31\dots 32)\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 + 3\text{CaO} + (31\dots 32)\text{H}_2\text{O}^\uparrow$ $3\text{CaO}\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO} + n\text{H}_2\text{O}^\uparrow$
600-1200	Інтенсивна деструкція поверхні пористого каркасу внаслідок розкладання клінкерних кристалічних зростків і, як наслідок, збільшення розміру пор	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} 2\text{SiO}_2 + 3\text{CaO}^\uparrow + 6\text{H}_2\text{O}^\uparrow,$ $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO} + 6\text{H}_2\text{O}^\uparrow,$ $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4 (31\dots 32)\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 + 3\text{CaO} + (31\dots 32)\text{H}_2\text{O}^\uparrow$ $3\text{CaO}\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{t^\circ} \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO} + n\text{H}_2\text{O}^\uparrow$

Процеси, що відбуваються в бетоні при його нагріванні в умовах пожежі призводять до незворотних деструктивних змін з помітним погіршенням міцнісних властивостей бетону. Деякі співвідношення міцності бетону і його окремих структурних утворень [50, 59, 93] у важкому залізобетоні наведені в табл. 1.6.

Співвідношення міцності бетону і міцності структурних утворень у важкому залізобетоні

№, п/п	Властивості залізобетону	Величина	Зміни властивостей під впливом пожежі
1.	міцність з'єднання бетону з арматурою	3–10 МПа	для гладкої арматури зменшується (при 100 °С на ~25%, при 500 °С до 0)
2.	міцність з'єднання розчину з крупним заповнювачем	2–25 МПа	зменшується
3.	міцність розчину	22–45 МПа	до 300 °С зростає, а після зменшується
4.	міцність цементного каменя	50–90 МПа	до 300 °С зростає, а після зменшується
5.	міцність крупного заповнювача	20–140 МПа	до 200 °С зростає, а після зменшується при 700°С на 20%
6.	міцність мілкового заповнювача	$R_{ст п} = 350$ МПа $R_{роз п} = 36$ МПа	до 200 °С зростає, а після зменшується
7.	міцність арматури	$\sigma_T = 220-1200$ МПа $\sigma_T = 300-1400$ МПа	після 400 °С зменшується до 40-50%
8.	міцність залізобетону (призм.)	$R_{28} = 20-60$ МПа	до 200 °С зростає на 10-15%, а після зменшується, при 300 °С, 500 °С, 800° С відповідно на 20%, 40%, 75%

Дослідження [100] фазового складу цементного каменя (ЦК) зразків, які нагрівалися без механічного навантаження, на растровому електронному мікроскопі показали, що фазовий склад каменя помітно змінюється. На рис. 1.3. показана вихідна мікроструктура і мікроструктура після прогріву для важкого бетону на гранітному заповнювачі.

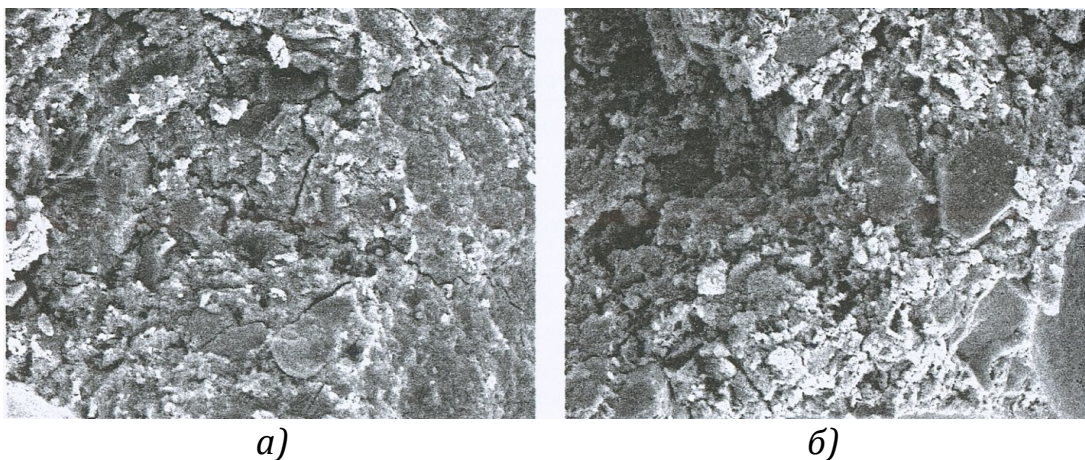


Рис. 1.3 – Мікрофотографії структури бетону до нагрівання (а) і після нагрівання до 600 °С (б)

На мікрофотографіях видно, що збільшується обсяг пор і тріщин. Крім того, мікроструктурний аналіз показав, що фазовий склад теж змінюється. Хімічні зміни в клінкерних матеріалах призводять до часткового відшарування цементного каменю від дрібного і крупного заповнювачів, причому, дефекти структури – це ділянки, де ці зміни відбуваються. Разом з тим, такий аналіз недостатньо точно відображає реальну картину, оскільки зразки піддавалися нагріванню в ненавантаженому стані.

1.2.2. Властивості арматурної сталі в умовах нагріву під час пожежі

Згідно з даними досліджень [27, 59, 93, 99] основні особливості властивостей арматурної сталі в умовах нагріву під час пожежі можна охарактеризувати даними табл. 1.7.

Таблиця 1.7.

Особливості поведінки арматурної сталі в умовах нагріву під час пожежі

Інтервал температури нагріву, °С	Особливості поведінки арматурної сталі	Механізм появи даної особливості	Дж.
20-100	Зменшення теплопровідності	Зміна фазового складу сталі (перекристалізація, рух дислокацій і т. д.) і пов'язані з ними додаткові витрати енергії	[93]
	Поступове збільшення теплоємності		
100-400	Зменшення теплопровідності	Зміна кристалічного і фазового складу сталі (А240 – крихкість, А400 і вище – графітизація і сферизація карбідів, термопружність сталі – розпад мартенситу і т. ін.)	[93]
	Поступове збільшення теплоємності		
	Зменшення межі текучості		
	Зменшення модуля пружності		
400-600	Зменшення теплопровідності	Подальше фізико-хімічне перетворення фазового складу сталей	[99]
	Поступове збільшення теплоємності		
	Зниження межі текучості до 80%		
> 750	Поява піку теплоємності	Випадання фази α -заліза. Розчинення шкідливих домішок і окислення кристалічних зерен.	[99]
	Абсолютна втрата міцності		

Процеси, що відбуваються в арматурній сталі при її нагріві в умовах пожежі призводять до незворотних деструктивних змін з помітним погіршенням міцнісних властивостей.

1.3. Вплив модифікаторів на властивості залізобетону при нагріванні

Сучасні технології залізобетону враховують використання широкого спектру модифікуючих добавок для отримання бетону. Добавки застосовують для підвищення реологічних властивостей розчинів, уповільнення або прискорення з'єднання бетонних сумішей, поліпшення характеристик міцності і деформаційних властивостей затверділого бетону, регулювання його щільності і т.д. В даний час вплив різних модифікуючих добавок на поведінку залізобетону при пожежі вивчено недостатньо.

1.3.1. Класифікація модифікаторів складів бетонів

Згідно з даними [42,45] застосовані модифікуючі добавки в складах бетонів можна розділити на шість основних типів, що мають різне призначення і різну фізико-хімічну взаємодію з компонентами розчинів і твердих фаз затверділого бетону. У табл. 1.8. показана структура основних типів добавок в бетоні і механізми їх взаємодії з компонентами бетону.

Таблиця 1.8.

Структура основних типів добавок і механізми їх взаємодії з фазами бетонних сумішей і затверділого бетону

№, п/п	Тип модифікатора	Активний засіб	Механізм взаємодії активного засобу з фазами бетонної суміші
1.	Добавки-регулятори реологічних властивостей бетонних сумішей: пластифікатори, суперпластифікатори і т.д.	ПАР на основі сірковмісних і хлоровмісних радикалів	Диспергованих клінкерних частинок за рахунок впливу на їхні реологічні властивості при зміні їх електричних потенціалів. У затверділому бетоні радикали модифікатора містяться в гелевій фазі між зернами ЦК
2.	Добавки-регулятори з'єднаність цементного тіста: сповільнювачі / прискорювачі з'єднань, протиморозні добавки	Сповільнювачі: тех. патока, НТФ*, та інші. Прискорювачі: CaCl ₂ , NaNO ₂ та інші.	Уповільнення: зв'язування вапна, перешкоди коагуляції зерен ЦК і т. д. Прискорення і протиморозний ефект: диспергування клінкерних частинок, підвищене тепловиділення при твердінні, антифризову дію і т.д.
3.	Добавки-регулятори пористості бетону: повітровтягуючі, газоутворюючі, ущільнюючі та інші	Полімеро-утворюючі смоли	Повітровтягуючі, газоутворюючі чи газопоглинаючі дії за рахунок хімічного звільнення, чи з'єднання адсорбованих газів.
4.	Добавки-модифікатори фаз затверділого бетону на макрорівні для отримання його особливих властивостей (міцності-деформативних, протиморозних, корозійностійких, бактерицидних і т.д.)	Мінеральні добавки, що мають розміри заповнення з певними геометричними, або внутрішніми властивостями	Поліпшення зчеплення між заповнювачами за рахунок проміжних частинок модифікатора з поліпшеними реологічними властивостями і зменшення концентрації напружень. Поліпшення деформативних властивостей за рахунок пластифікуючої дії добавок

Продовження таблиці 1.8.

5.	Добавки-модифікатори фаз затверділого бетону на мікрорівні для отримання його особливих властивостей: мікро- і нанопорошків, замінників і наповнювачів в'язучих компонентів	Мінеральні і полімерні мікро- і нанопорошки	Поліпшення процесу гідrataції за рахунок утворення більшої кількості центрів утворення грісталогідратів, і, як наслідок, їх поліпшена гомогенізація. Взаємопроникнення кристалогідратної і полімерної матриць, і, як наслідок, поліпшення характеристик міцності-деформативних властивостей
6.	Комплексні добавки, що складаються з комбінації різних типів модифікаторів	Комбінація різних модифікуючих добавок	Комбінований механізм дії перерахованих вище добавок

Найбільшого поширення набули добавки, які підвищують легкоукладність бетонних сумішей оскільки вони мають найбільший економічний ефект. Внаслідок цього практично все промислове виробництво бетону відбувається із застосуванням пластифікаторів, протиморозних добавок і суперпластифікаторів, які згідно з даними [42, 49, 106] можуть об'єднати в собі функції перших двох модифікуючих добавок. Наявність великої кількості літератури [42, 49, 93] дає багато даних про вплив добавок на різні властивості бетону та залізобетону. У табл. 1.9. показано вплив, який чинить добавки на основні властивості бетону. Згідно з даними табл. 1.9. добавки в цілому надають поліпшену дію на властивості готового бетону, особливо це стосується його міцності, стійкості до корозії, сульфатостійкості і т.д.

Таблиця 1.9.

Вплив модифікуючих добавок на основні властивості бетону

Модифікуюча добавка	Основні властивості бетону і залізобетону						
	Міцність	Модуль пружн.	Пористість	Короз. стійк.	Морозостійк.	Короз. ст. арм.	Зчеплен. з армат.
Пластифікатор	Збільш.	Збільш.	Зменш.	Нейтр.	Нейтр.	Погірш.	Погірш.
Протиморозна добавка	Збільш.	Збільш.	Зменш.	Покращ.	Нейтр.	Погірш.	Покращ.
Суперпластиф	Збільш.	Збільш.	Зменш.	Покращ.	Нейтр.	Нейтр.	Покращ.

1.3.2. Вплив модифікаторів бетону на поведінку залізобетонних конструкцій в умовах пожежі

Відповідно даних робіт [42, 49, 106] властивості одержаних бетонів з модифікуючими добавками широко вивчені, проте питання їх впливу на властивості залізобетону в умовах нагріву вивчені і висвітлені недостатньо. Це вимагає свого розкриття в рамках дослідження вогнестійкості залізобетонних конструкцій, зведених на основі модифікованого бетону. Важливість

порушеного питання підтверджується тим, що механізми модифікації властивостей бетонних сумішей і затверділого бетону призводять до зміни властивостей модифікованих бетонів в умовах нагріву. При вивченні цього питання необхідно розглянути сценарії та умови втрати несучої здатності балок за умови вогневого впливу пожежі. Щодо використання елементом ресурсу опору можливо кілька сценаріїв його руйнування [26, 27, 30, 33, 47].

1. Напруження в арматурі, досягнувши межі текучості, призводить до утворення великих прогинів;

2. Руйнування відбувається внаслідок розриву арматури і елемент відчуває повну деструкцію;

3. Фіброві деформації стиснутого бетону досягають граничних значень, і дані шари руйнуються, в даному випадку можливе утворення подібності пластичного шарніра;

4. Зменшення стиснутої зони вже не компенсується збільшенням плеча внутрішньої пари сил, при цьому теж можливе утворення пластичного шарніра;

5. Уздовж арматури відбувається розколювання бетону внаслідок втрати їх взаємного зчеплення.

Добавки можуть впливати на властивості бетону та арматури, які мають важливе значення при реалізації цих сценаріїв. До таких властивостей відносяться:

- швидкість прогрівання внутрішніх шарів бетону;
- міцність бетону;
- деформативність бетону;
- міцність зчеплення бетону і арматури.

Дослідження [26] показують, що дані властивості залізобетону можуть бути схильні до впливу модифікуючих добавок внаслідок зменшення пористості каркаса цементного каменю, підвищених швидкостей його вигорання при термічному впливі пожежі, енто- або екзотермічних ефектів при термохімічних перетвореннях в цементному камені з добавками, порушеннями адгезійної і когезійної взаємодії між компонентами залізобетону.

З огляду на наведені дані, можна зробити висновок, що вплив модифікуючих добавок в бетоні на вогнестійкість залізобетонних конструкцій вимагають більш широких досліджень, що включають різне їх поєднання з різними видами великого і дрібного заповнювача, водоцементного співвідношення, технологічних особливостей приготування бетону і т.д.

1.4. Методи визначення фактичних меж вогнестійкості

Беручи до уваги різні особливості приготування бетонних сумішей, в тому числі з використанням добавок, слід зауважити, що при визначенні фактичних меж вогнестійкості (ФМВ) необхідні досить надійні методи, що дозволяють кожний раз їх враховувати. При визначенні фактичної межі

вогнестійкості в більшості країн на стадії проектування перевага віддається розрахунковим, а на стадії зведення і здачі в експлуатацію експериментальним методом, пов'язаним з проведенням натурних вогневих випробувань. Крім зазначених методів існують альтернативні підходи, що поєднують в різному ступені проведення натурних або лабораторних випробувань і розрахункові процедури.

Найбільш достовірним і надійним вважається метод на основі вогневих випробувань залізобетонних конструкцій [1-20]. При реалізації даного методу використовують установки, що комбінують нагрівальні вогневі печі і засоби навантаження. Схема проведення випробувань показана на рис. 1.4.

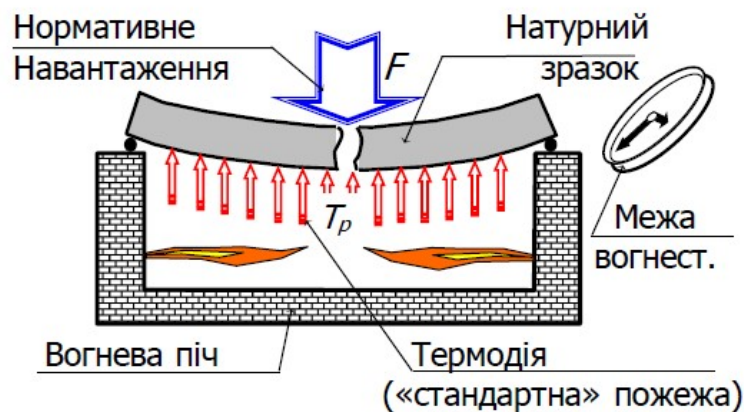


Рис. 1.4 – Схема проведення випробувань залізобетонних конструкцій на вогнестійкість

До вогневих печей висуваються особливі вимоги, які полягають в тому що, нагрівальний факел повинен працювати на рідкому паливі, полум'я факела не повинно стосуватися нагрівальних поверхонь елементів конструкцій, за обсягом камери має бути рівномірний розподіл температури і температура протягом випробування повинна змінюватися відповідно до температурного режиму пожежі, визначеного в міжнародному стандарті [8]. У більшості випадків визначають ФМВ будівельних конструкцій на основі температурного режиму «стандартного» пожежі [21-30]. Температурний режим пожежі на стадії розвитку виражається такою формулою:

$$T_p = T_0 + 345 \cdot \lg(8\tau + 1) \quad (1.3)$$

де τ – тривалість пожежі в хв.

Така залежність в більшості випадків не відповідає реальній температурній кривій при пожежі [38] і застосовується для

відтворюваності стандартних експериментальних досліджень залізобетонних конструкцій на вогнестійкість.

До переваг даного методу слід віднести високу точність, достовірність результатів, наочність, простоту обробки і інтерпретації результатів експериментів, а також можливість прямим чином врахувати технологічну спадковість залізобетону при виготовленні натурального зразка.

Основними недоліками даного методу для системного дослідження впливу добавок в бетони на вогнестійкість залізобетонних конструкцій, що зводяться на їх основі є значна громіздкість, трудо-, матеріало- і ресурсомісткість проведення експериментів. Також необхідно врахувати існування похибок, пов'язаних з метрологічними, конструктивними і технологічними особливостями випробувальних установок, величини яких наведені в табл. 1.10.

Таблиця 1.10.

Джерела похибок при проведенні натурних вогневих випробувань

№, п/п	Джерело похибки	Похибка, %
1.	Невідповідність температурного режиму випробувань стандартному температурному режиму	15 [122]
2.	Похибка термопар, обумовлена теплообміном між газовим середовищем в камері печі і їх поверхнею	6 [9, 16 – 20]
3.	Невідповідність геометрії випробуваного зразка до геометрії реального елемента	15 [122]
4.	Невідповідність граничних умов навантаження і закріпленого зразка граничним умовам реального елемента	10 [122]

Наведені дані показують, що використання методу визначення фактичної межі вогнестійкості на основі вогневих випробувань конструкцій не завжди є обґрунтованим і раціональним.

На стадії проектування вогнестійких будівельних конструкцій ефективними є розрахункові методи [21, 22, 24, 25]. Всі розрахункові методи можна умовно розділити на дві групи по застосуванню базовими математичними моделями, що описують напружено-деформований стан. Розрахункові методи, які використовують моделі стрижневої механіки в комбінації з гіпотезою плоских перетинів називаються спрощеними. Структура застосованих спрощених методів показана на рис. 1.5.



Рис. 1.5 – Структурна схема спрощених розрахункових методів визначення вогнестійкості залізобетонних конструкцій

Спрощені методи не вимагають складних розрахунків, реалізуються при мінімумі вихідних даних, тому набули найширшого розповсюдження, а їх процедури увійшли в набори стандартних методик відповідних норм багатьох провідних держав [24, 25].

Проте дані методи мають серйозний недолік, який полягає у виникненні великих похибок результатів розрахунків (близько 25 – 30%) [33]. Виникаючі похибки обумовлені грубістю використаних моделей і відсутністю гнучкості вихідних даних, які не враховують технологічну спадковість залізобетону. У деяких випадках при табличному методі або методі критичної температури навіть не враховуються діючі навантаження.

Уточненими розрахунковими методами визначення ФМВ називаються методи, які розглядають залізобетонні конструкції, як масивні елементи із застосуванням систем диференціальних рівнянь пружно пластичного деформованого тіла. В силу того, що з фізичної точки зору дана задача є термопружнопластичним завданням для твердих тіл складної конфігурації, для її вирішення залучаються чисельні методи, засновані на сіткових дискретизаціях розрахункових областей. Чисельна реалізація може здійснюватися за допомогою спеціальних або універсальних комп'ютерних систем. Відомі роботи [71, 72], в яких такі методи успішно застосовуються для визначення ФМВ залізобетонних конструкцій.

Важливою перевагою даних методів є те, що при їх реалізації виходить комплекс просторово-часових даних, на основі яких можна отримати велику кількість інформації, що дозволяє проаналізувати причини і сценарії руйнування конструкцій. Крім цього, вони мають більш високу точність і наочність, ніж спрощені методи, а також дозволяють більш жорстко проконтролювати достовірність отриманих результатів.

Недоліками даних методів є обмежена можливість врахувати технологічну спадковість залізобетону і пов'язана з нею похибка, складність і громіздкість обчислювальних операцій, що вимагають високої кваліфікації персоналу, а також обмеження в застосуванні спеціалізованого програмного забезпечення в зв'язку з його високою вартістю.

Для визначення ФМВ також ефективно застосовуються експериментально розрахункові методи. Сутність всіх експериментальних методів полягає в проведенні комплексу лабораторних випробувань малих зразків і подальшої математичної обробки отриманих результатів з метою їх відповідної інтерпретації. Добре розроблені експериментально-розрахункові методи [10, 118, 119], засновані на ідентифікації ефективних теплофізичних характеристик бетону при проведенні експериментів по нагріванню зразків з реалізацією різних режимів нагріву, ГУ і геометричної конфігурації випробовуваних бетонних зразків. При цьому ідентифіковані ТФХ можуть бути отримані як коефіцієнти рівняння теплопровідності в чистому вигляді [118], або як відповідні фізичні параметри систем диференціальних рівнянь теорії сушіння [38-41, 115]. Зазначені методи широко поширені і дуже ефективні, оскільки дозволяють врахувати феноменологію технологічної спадковості залізобетону прямим чином на основі порівняно недорогих і мало трудомістких експериментів. Однак, при визначенні вогнестійкості несучих конструкцій їх застосування обмежено в силу того, що при цьому характеристики міцності залізобетону не ідентифікують, а це призводить до появи значних похибок. Крім того, дані методи застосовуються в комплексі з спрощеними розрахунковими методами при вирішенні завдання на міцність.

У роботах [72] розвинений ефективний метод заснований не тільки на ідентифікації ТФХ, а й на ідентифікації міцності арматурної сталі і бетону в умовах нагріву у вигляді їх коефіцієнтів роботи. При цьому даний метод є більш точним, але його основний недолік полягає в застосуванні більш складних математичних моделей НДС залізобетону в умовах пожежі, що вимагають великої кількості розрахункових процедур, а також високої кваліфікації персоналу, який здійснює розрахунки.

Одним з найбільш ефективних є експериментально-розрахунковий метод, розвинений в роботах [59]. Даний метод ґрунтується на уявленні перетину стиснутих елементів дискретними моделями з його фізичним поділом на відповідні зразки, що моделюють внутрішні шари бетону. Кожен із зразків піддається комбінованому силовому і температурному

впливу, який отримує відповідний шар всередині перетину. При цьому спочатку ідентифікуються ТФХ бетону, потім розраховуються режими термосилового впливу, потім вони реалізуються за допомогою експериментального устаткування, після цього отримані результати випробувань підлягають математичній обробці, в результаті чого ФМВ визначається за обчисленими інтегральними критеріями.

Крім загальних переваг експериментально-розрахункових методів даний 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 розрахований на застосування тільки для стиснутих елементів залізобетонних конструкцій. На наш погляд усунення даного недоліку може бути можливо розв'язати завданням, якщо врахувати, що при розгляді схем руйнування втрата несучої здатності залізобетонних конструкцій при пожежі настає при використанні ресурсу опору в стислій зоні бетону внаслідок зменшення опору деформації арматурної сталі, яка не має розкиду теплофізичних і міцнісних параметрів через технологічну спадковість.

1.5. Математичні моделі поведінки залізобетону при пожежі

Всі математичні моделі, що використовуються при реалізації методів визначення ФМВ несучих залізобетонних конструкцій, можна розділити на моделі, які є загальними для всіх методів і на окремі моделі, властиві певним методам або їх групам. Важливою для реалізації всіх без винятку методів, включаючи і вогневі випробування, є математична модель пожежі. Для моделювання температурного режиму в приміщенні застосовується стандартна температурна крива пожежі [24, 25], що описується виразом (1.1). Дана математична модель прийнята для уніфікації експериментальних і розрахункових результатів, оскільки встановлює єдині критерії для роботи елементів будівельних конструкцій під час пожежі.

При постановці завдання опису термонапруженого стану залізобетону при тепловій дії пожежі слід врахувати, що формально вона є завданням термопружнопластичності для матеріалу, який є незвичайним композитним матеріалом, що поводить себе в певних умовах як конструкція [50, 66, 95]. Це обумовлює введення деяких загальних спрощень для розрахункових методів, які полягають в розподілі теплових та механічних завдань. Таким чином, в кожному розрахунковому методі спочатку визначаються просторово-часові температурні розподіли як результат рішення теплової задачі, а потім комплекс параметрів НДС залізобетону при використанні температурних розподілів в якості додаткового навантаження. Такий підхід є обґрунтованим при наявності даних, що параметри НДС частково впливають на параметри і ГУ теплової задачі. При

вирішенні теплових та механічних завдань існує велика кількість використаних математичних моделей, що описують поведінку залізобетону в умовах пожежі.

1.5.1. Математичні моделі теплообміну в залізобетонних конструкціях в умовах пожежі

Для опису теплопередачі в залізобетонних конструкціях прийняті основні допущення, що стосуються як спрощених, так і уточнених методів розрахунку вогнестійкості. Тепловий розрахунок згідно більшості робіт заснований на таких основних положеннях:

1. При розрахунку враховується градієнт температурних розподілів тільки по перерізу елемента.

2. В силу великої різниці в теплопровідності арматурної сталі і бетону, теплообмін враховується тільки в бетоні.

3. ТФХ бетону показують або постійними коефіцієнтами, або їх температурними залежностями.

Дані положення визначають вид базових рівнянь, що описують теплопередачу в елементах залізобетонних конструкцій. Найбільш простим є підхід, при якому теплопередача описується лінійним двовимірним рівнянням теплопровідності [21, 22], де коефіцієнти усереднюються для діапазону температур прогріву з урахуванням вологості. При цьому воно має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_{\text{red}} \nabla^2 T, \quad a_{\text{red}} = \frac{\lambda}{(c_p + 0,012w)\rho_0} \quad (1.4)$$

де T, t – відповідно температура і час;

a_{red} – приведений коефіцієнт теплопровідності;

λ, c_p – коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємності, усереднені для діапазону температур прогріву;

w – початкова вагова вологість;

ρ_0 – щільність бетону в сухому стані.

В даному випадку математична модель теплопередачі є дуже грубою.

Більш точним є підхід, при якому теплопередача описується квазілінійним рівнянням Фур'є у вигляді:

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

Даний підхід набув найбільшого поширення. Наприклад, нормативні документи [24, 25] прямо рекомендують використання

даного методу для розрахунків температурних полів в перетинах елементів залізобетонних будівельних конструкцій. Це пояснюється тим, що рівняння (1.5) представлено у відносно простій формі, для нього добре розроблені методи рішення і програмного забезпечення.

Для обох підходів використовуються температурні залежності ТФХ, які показані в табл. 1.11.

Таблиця 1.11.

Теплофізичні характеристики бетону

№	Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(T)$, Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(T) \cdot \rho(T)$, Дж/(м ³ ·°С)	Джерело
1.	1.042	$2.525 \cdot 10^6$	[21]
2.	$1,2 - 0,00035 \cdot T$	$2300 \cdot (710 + 0,83 \cdot T)$	[22]
3.	$2 - 0,2451 \frac{T}{100} + 0,0107 \left(\frac{T}{100} \right)^2$	$\rho(T) \cdot 900$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$, $\rho(T)(900 + (T - 100))$ при $100^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C}$, $\rho(T)(1000 + 0,5(T - 100))$ при $200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C}$, $\rho(T) \cdot 1100$ при $400^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$	[25]
4.	$1,6 - 0,16 \frac{T}{120} - 0,008 \left(\frac{T}{120} \right)^2$	$2300 \cdot \left(900 + 80 \frac{T}{120} - 4 \left(\frac{T}{120} \right)^2 \right)$	[88]
5.	$2.078 - 0.04 \cdot T + 2.733 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 7.351 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 7.431 \cdot 10^{-10} T^4$ при $T \leq 311^\circ\text{C}$ $3.803 - 0.033 \cdot T + 1.293 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2.036 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 1.112 \cdot 10^{-10} T^4$ при $T > 311^\circ\text{C}$.	$3.241 \cdot 10^6 - 8.791 \cdot 10^4 T + 84747 \cdot T^2 - 2.86 \cdot T^3 + 3.251 \cdot 10^{-3}$ при $T \leq 311^\circ\text{C}$ $608 \cdot 10^6 - 4.25310^4 T + 174964 T^2 - 0.308 T^3 + 1.88910$ при $T > 311^\circ\text{C}$	[59]

Результати досліджень [38 – 41] показують, що даний підхід є ефективним, якщо рівняння (1.2) і (1.3) доповнюються ГУ III роду, що мають вигляд:

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

де T_p , T_w – відповідно температури пожежного середовища і поверхні елемента.

Коефіцієнт теплообміну α враховує дію конвекції і інфрачервоного випромінювання і дорівнює [38 – 41]:

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

де α_p – коефіцієнт теплообміну випромінювання;
 $\alpha_k = 25 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коефіцієнт теплообміну конвекції.

Коефіцієнт α_p знаходять за формулою:

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

C_1 – коефіцієнт випромінювання поверхні;

C_s – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε – ступінь чорноти навколишнього середовища.

Коефіцієнт теплообміну на не нагрітій стороні визначають за формулою:

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

де ΔT – різниця температур між середовищем і поверхнею.

Згідно з рекомендаціями [24] конвективну і радіаційну складові можна визначити з виразів:

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

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

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

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

Даний метод є ефективним, і добре себе зарекомендував, проте не може вважатися універсальним, оскільки завжди повинен доповнюватися даними експериментів. Крім цього, модель є досить неточна в силу прийнятих спрощених припущень.

У роботах [115] запропонована більш точна математична модель, яка з'явилася в результаті розвитку математичного апарату для процесів сушіння пористих матеріалів [124, 126]. В даному випадку використовується така система рівнянь:

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + r_t \rho_0 V_t \frac{\partial T}{\partial t}, \quad c_s \rho_0 \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(\lambda_p \nabla p) + \rho_0 V_t \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.11)$$

де C_t, C_p – відповідно питомі теплоємність і пароємність бетону;

λ_t, λ_p – відповідно коефіцієнти теплопровідності і паропроникності бетону;

g – питома теплота випаровування вологи;
 B_t – вологісний коефіцієнт інтенсивності сушіння, який визначається за формулою $B_t = \partial u / \partial t$;
 u – вологість бетону у відносних одиницях.

Отримані результати досить точні, в порівнянні з даними експерименту, відтворюють температурні криві нагріву внутрішніх шарів бетону [115].

Більш точну модель для опису теплопередачі в бетоні з вологою в порах, присвячений комплекс робіт В. Л. Страхова і інші. [38 – 41]. При цьому враховуються процеси вологопереносу і випаровування, процеси зменшення щільності цементного пористого каркаса за рахунок його хімічного розпаду внаслідок високотемпературного нагріву, а також втрати теплової енергії на ці процеси. Таким чином, рівняння теплопровідності має вигляд:

$$(1-\varphi)\rho'C\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{\Sigma}\nabla T) + C_p''\bar{m}''\nabla T + C_w\bar{m}_w\nabla T - \sum_{\beta=1}^B Q_{\beta}\dot{R}_{\beta} + r\dot{R}_k$$

$$\nabla\bar{m}'' = \sum_{\beta=1}^B \dot{R}_{\beta} - \dot{R}_k \quad (1.12)$$

де φ – пористість;
 ρ – щільність;
 C', C_p – теплоємність;
 x_i – координати;
 λ_{Σ} – сумарний коефіцієнт теплопровідності;
 \bar{m}'' – вектор масової швидкості руху пари в проникаючому пористому середовищі;
 C_w – теплоємність рідкої фази продуктів піролізу;
 \bar{m}_w – вектор масової швидкості фільтрації рідкої фази;
 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 фазового переходу води в пароутворюючий стан;
 \dot{R}_k – об'ємна швидкість виділення маси при конденсації пари;
індекс «'» відповідає каркасу пористого матеріалу;
індекс «''» відповідає парі, який заповнює пори.
Показане рівняння теплопередачі доповнюється рівнянням переносу маси рідкої фази всередину пор:

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla(\rho_0 D_w \nabla w) + \dot{R}_c \quad (1.13)$$

і рівнянням переносу маси газоподібних продуктів піролізу:

$$C_m \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(\lambda_m \nabla p) + \nabla(K_D \nabla p) + R + R_c \quad (1.14)$$

де ρ_0 – об'ємна щільність матеріалу в початковому стані;

w – об'ємний вміст рідкої фази;

D_w – коефіцієнт дифузії рідкої фази;

K_D – коефіцієнт дифузії піролізних газів;

C_m – теплоємність пористого середовища по відношенню до піролізного газу;

p – паровий тиск в середині;

λ_m – коефіцієнт молярного перенесення газу в пористому середовищі.

Система рівнянь (1.12) – (1.14) замикається фізичними визначальними співвідношеннями для піролізного газу і рідкої фази в порах і відповідними граничними умовами.

Недоліком останніх двох підходів є їх складність, велика кількість вихідних даних, які визначаються в результаті додаткових складних експериментів і відповідної математичної інтерпретації.

1.5.2. Математичні моделі напружено-деформованого стану в залізобетонних конструкціях в умовах пожежі

Математична модель ПДВ балки для спрощеного ізотермічного методу заснована на визначенні ефективної стиснутої зони в перерізі елемента з урахуванням ізотерм критичної температури ≈ 500 ° C і аварійної роботи арматури в умовах нагріву. При цьому розрахунок проводиться за формулами [21, 22, 24]:

$$\gamma_{st} = M_n / R_{an} A_a (h_0 - 0,5x); \quad x = (R_{an,t} A_a - R_{at} A'_a) / R_{bn} b, \quad (1.15)$$

де M_n – максимальний момент від нормативного навантаження;

R_{an} , R_{at} нормативний опір арматурної сталі відповідно при розтягуванні і при стисненні;

$R_{an,t}$ – знижений нормативний опір арматурної сталі розтягування, після термодії;

h_0 , b – відповідно розрахункова висота і ширина перетину плити;

A_a , A'_a – площі перерізу стиснутої і розтягнутої робочої арматури.

За певним коефіцієнтом роботи арматури γ_{st} – визначають критичну температуру нагрівання арматури, а за значенням критичної температури прогріву визначають межу вогнестійкості.

Більш точна математична модель застосовується для зонального методу [25]. При цьому для ділянок з приблизно однаковою температурою,

на які поділяється перетин, знаходяться параметри механічних властивостей бетону і арматури при даній температурі. В цьому випадку використовуються формули для визначення пошкодженої зони:

$$a_z = h \left[1 - \frac{\gamma_{mb}}{\gamma_{bt}} \right], \quad \gamma_{mb} = \frac{(1 - 0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^m \gamma_{bti}, \quad (1.16)$$

де n – кількість зон.

Після знаходження товщини пошкодженої зони розрахунок проводиться для залишкового перетину, як при нормальній температурі з урахуванням ослаблення арматурної сталі під дією температури.

Деформаційна модель НДС залізобетонних конструкцій в умовах пожежі [24] заснована на поділі перетину на кілька паралельних шарів. При визначенні несучої здатності залізобетонної плити використовуються формули:

$$\begin{cases} \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} Y_{bi} + \sum_j \sigma_{aj} A_{aj} Y_{aj} = M_x \\ \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} + \sum_j \sigma_{aj} A_{aj} = 0 \end{cases}, \quad (1.17)$$

$$\sigma_{bi} = E_{bti} v_{bi} \varepsilon_{bi}, \quad \sigma_{aj} = E_{atj} v_{aj} \varepsilon_{aj}, \quad \varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{bi}, \quad \varepsilon_{aj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{aj},$$

$$M_R = \frac{1}{r} \left(\sum_i A_{bi} Y_{bi}^2 E_{bti} v_{bi} + \sum_j A_{aj} Y_{aj}^2 E_{atj} v_{aj} \right) + \varepsilon_0 \left(\sum_i A_{bi} Y_{bi} E_{bti} v_{bi} + \sum_j A_{aj} Y_{aj} E_{atj} v_{aj} \right) \quad (1.18)$$

де M_x – зовнішній головний момент;

M_R – несуча здатність плити;

A_{bi} , Y_{bi} , σ_{bi} – площа, координати центру ваги i -ї ділянки бетону і напруга на рівні центра ваги;

A_{aj} , Y_{aj} , σ_{aj} – площа, координати центру ваги j -го стержня арматури і напруги в ньому;

ε_0 – відносна деформація волокна, розташованого на перетині вибраних осей;

$1/r$ – кривизна поздовжньої осі в розглянутому поперечному перерізі елемента;

E_{bti} , E_{atj} – модулі пружності бетону i -ї ділянки і арматури j -го стержня;

v_{bi} , v_{aj} – коефіцієнти пружності бетону i -ї ділянки і арматури j -го стержня.

Коефіцієнти v_{bi} і v_{aj} приймають за відповідними діаграмами стану бетону та арматури [24].

Більш суворий підхід до визначення фактичних меж вогнестійкості елементів залізобетонних конструкцій полягає в поданні їх у вигляді масивних елементів.

У загальному випадку використовуються диференціальні рівняння відомі з теорії деформованого твердого тіла з урахуванням температурних деформацій. У загальному вигляді дані рівняння для елементарного об'єму мають такий вигляд [95]:

- рівняння статичної рівноваги:

$$\mathbf{D}^T \boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{p}} = 0; \quad (1.19)$$

- рівняння перетворення вектора напружень до вектору напружень, що діють на нормальному майданчику та граничні умови на поверхні масиву:

$$\mathbf{q} = \mathbf{T}_n^T \boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q}|_{S_q} = \bar{\mathbf{q}}; \quad (1.20)$$

- кінематичні рівняння об'єднання деформацій з граничними умовами на поверхні:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\mathbf{u} + \boldsymbol{\varepsilon}_t, \mathbf{u}|_{S_u} = \bar{\mathbf{u}}; \quad (1.21)$$

- рівняння стану:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}(\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}_t) + \boldsymbol{\sigma}_0. \quad (1.22)$$

В дані рівняння входять наступні параметри:

$$\mathbf{D}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} - \text{матриця диференціального оператора};$$

$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx})^T$ – вектор напруг;

$\bar{\mathbf{p}} = (X Y Z)^T$ – вектор об'ємних сил;

$$\mathbf{T}_n^T = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & n_y & 0 & n_z \\ 0 & n_y & 0 & n_x & n_z & 0 \\ 0 & 0 & n_z & 0 & n_y & n_x \end{bmatrix} - \text{матриця направляючих косинусів до}$$

нормальної заданої площадки;

$\sigma = (\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx})^T$ – вектор напруг;

$\varepsilon = (\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx})^T$ – вектор деформацій;

E – матриця коефіцієнтів пружності;

$\varepsilon = (\alpha_t T \alpha_t T \alpha_t T 0 0 0)^T$ – вектор температурних деформацій;

σ_0 – вектор діючої напруги при навантаженнях згідно розрахункових схем конструкції.

Всі математичні моделі НДС залізобетону при пожежі повинні бути доповнені математичними моделями механічних і термомеханічних властивостей бетону і арматурної сталі у вигляді діаграм деформування, а також температурних залежностей термічної деформації.

У табл. 1.12. зведені механічні властивості бетону та арматури, що використовуються при розрахунку на вогнестійкість згідно Євростандартам. Також існують механічні властивості, виведені експериментально різними авторами.

Таблиця 1.12.

Механічні характеристики бетону і арматури

№, п/п	Навантаження в бетоні, МПа; граничні деформації бетону	Навантаження в арматурі, МПа; граничні деформації арматурної сталі	Дж.
1.	при $0 < \varepsilon_b < \varepsilon_{b1}$, $\sigma_b = E_{b,red,r}\varepsilon_b$, при $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T}$ (стиск), $\sigma_b = R_{bt,T}$ (розтяг)	при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T}\varepsilon_s$; $\varepsilon_{s0} = R_{s,T}/E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$.	[24]
2.	при $0 < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{c1,T}$, $\sigma(\varepsilon) = \frac{3\varepsilon_b R_{b,T}}{\varepsilon_{c1,T} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{c1,T}} \right)^3 \right)}$, при $\varepsilon_{c1,T} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2}$, $\sigma(\varepsilon) = R_{b,T} \frac{R_{b,T}(\varepsilon_b - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{c1,T}}$,	при $0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T}\varepsilon_s$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy}$ $\sigma_s = R_{sp,T} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}$, при $\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st}$ $\sigma_s = R_{s,T}$, при $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st})/(\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})]$, при $\varepsilon_{s2} < \varepsilon_s$ $\sigma_s = 0$,	[88]
3.	$\sigma(\varepsilon) = R_{b,T} \cdot \left(a_1 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bRT}} \right)^3 + a_4 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^4 + a_5 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right) \right)$; $\varepsilon_{bRT} = K_b \varepsilon_{bR}$; $R_{b,T} = \gamma_{bT} R_b$ $K_{bT} = 2 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,003 \cdot T + 0,9119$;	Для арматури з 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 $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$.	[48]

Продовження таблиці 1.12.

4.	$K_{bT} = -8 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,0006 \cdot T + 1,0213;$ $a_1 = 2,143; a_2 = -1,118; a_3 = -0,205;$ $a_4 = 0,217; a_5 = -0,023; \varepsilon_{bR} = 0,0018$	<p>Для арматури з 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> $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$	
5.	<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> $\sigma = \left(22 \cdot -1,4 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right)^3 \right) R_{b,T}$ $\varepsilon_{b0} = 0,002 \left(1 + 5 \left(\frac{T}{1000} \right)^{1,7} \right);$ <p>при $\varepsilon_{b0} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T} \frac{\varepsilon_b - p}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{b0}}$</p> $\varepsilon_{b2} = 1,6 \varepsilon_{b0}$ $p = \frac{(\varepsilon_b / \varepsilon_{b0}) R_{b,T}}{1,8((\varepsilon_b / \varepsilon_{b0}) - 1)^2 + (\varepsilon_b / \varepsilon_{b0})}$	<p>при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s; \varepsilon_{s0} = R_{s,T} / E_{s,T}$</p> <p>при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}; \varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}.$</p>	[25]
6.	<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 $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b0}$</p> $\sigma_b = 0,6 R_{b,T} + \frac{R_{b,T}(1-0,6)}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} \varepsilon_b,$ <p>ε_{b0} – табл. значень</p> <p>при $\varepsilon_{b0} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T}, \varepsilon_{b2} = 1,7 \varepsilon_{b0}$</p>	<p>Для арматури з 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 з 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> $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$	[77]

Важливою особливістю матеріалів, з яких складається залізобетон є облік їх температурного розширення. Відносно бетону слід зауважити його особливість, що обмеження температурного розширення призводить до

утворення усадкових деформацій за рахунок утворення тріщин. Тому більшість авторів рекомендує комплексно враховувати обидві деформації, розглядаючи узагальнену деформацію, яка визначається виразами:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{bt} - \varepsilon_{cs} = (\alpha_{bt} - \alpha_{cs})\Delta T, \quad (1.23)$$

Де ε_{bt} деформація за рахунок температурного розширення бетону;
 ε_{cs} – деформація за рахунок усадки бетону при утворення тріщин і інших необоротних процесах;

α_{bt} – коефіцієнт терморозширення бетону;

α_{cs} – коефіцієнт температурної усадки.

На рис 1.6. показані залежності температурних деформацій згідно нормативних документів [24, 25].

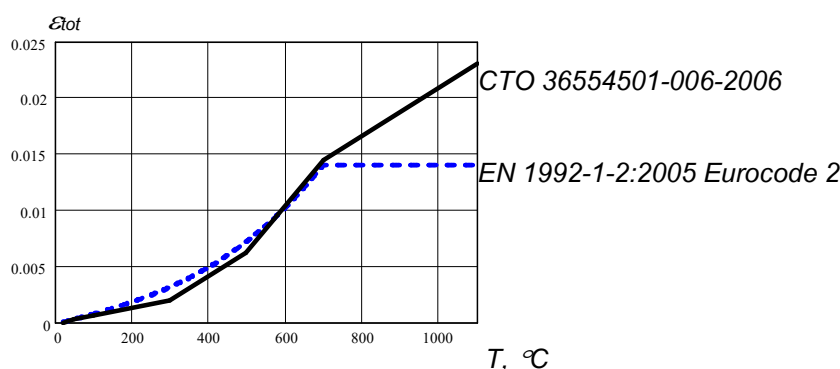


Рис. 1.6 – Моделі температурних деформацій важкого бетону на гранітному заповнювачі згідно СТО 36554501-006-2006 та EN 1992-1-2: 2005 Eurocode 2

Також важливою особливістю є термічне розширення арматурної сталі. Температурне розширення арматурної сталі значно вивчено і існують досить добре перевірені його математичні моделі.

На рис. 1.7. показані математичні моделі температурної деформації арматурної сталі, рекомендовані для розрахунку нормативів [24, 25].

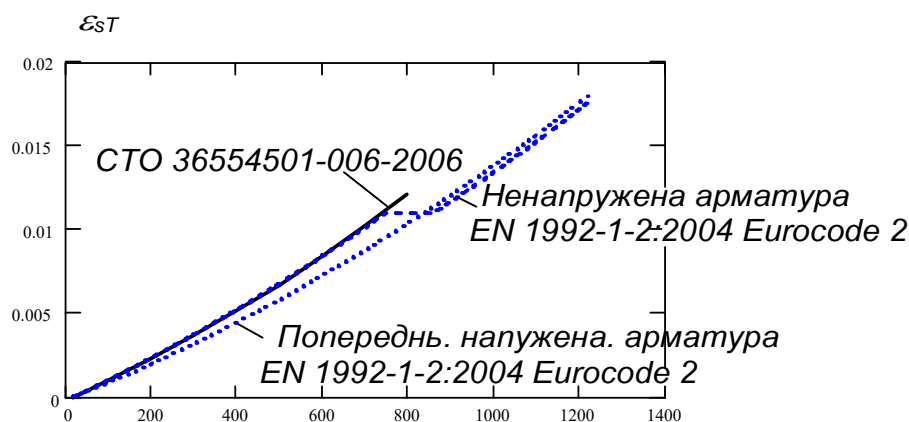


Рис. 1.7 – Моделі температурних деформацій арматурної сталі згідно СТО 36554501-006-2006 і EN 1992-1-2: 2004 Eurocode 2

Порівняльний аналіз показує досить різні математичні моделі поведінки матеріалів, що становить залізобетон під час пожежі. Всі вони не можуть враховувати його технологічну спадковість. Така різноманітність зумовлює необхідність додаткових досліджень з метою ідентифікації найбільш ефективних математичних моделей, що описують властивості залізобетону з урахуванням впливу добавок в бетони.

1.5.3. Математичний опис поведінки залізобетонних конструкцій в умовах пожежі для експериментально-розрахункових методів

Недоліків розрахункових методів позбавлені експериментально-розрахункові методи, які частково включають в себе фізичне моделювання термодії пожежі на лабораторних зразках з метою математичного опису групи певних особливостей поведінки елемента залізобетонної конструкції в умовах пожежі [59]. Як правило, такий математичний опис є ідентифікатором температурних залежностей теплофізичних, або пружно-пластичних параметрів компонентів залізобетону в діапазоні температур нагрівання при пожежі.

Ідентифікація невідомих параметрів відбувається за допомогою рішення оптимізаційної задачі при пошуку мінімуму цільового функціоналу виду [118, 119]:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i (Q_{Эi} - Q_{Pi})^2} , \quad (1.24)$$

де $Q_{Эi}$ – експериментальне значення параметра стану зразка для i -ї просторово-часової точки;

Q_{Pi} – розраховане значення параметра стану зразка для i -ї просторово-часової точки, яке визначається як сума вузлових реакцій.

РОЗДІЛ II ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Експериментальне обладнання

До основного експериментального обладнання відноситься: сушильна шафа СНОЛ 3,5.35.3,5/3М; сушильна шафа СЕШ-3М; муфельна піч СНОЛ 1,6.2.0.0,8/9-М-1; нагрівальна піч з газовим пальником; розривна машина Р-10; випробувальний прес ІП-500; установка, що зібрана на базі муфельної печі і гідравлічного домкрата.

2.1.1. Устаткування і матеріали для виготовлення зразків

При виготовленні зразків використовувалися матеріали, які відповідні важкому бетону на гранітному щебені: портландцемент марки «500»; кварцовий річковий пісок фракції ~ 1 мм; щебінь гранітний фракцій від 5 – 10 мм до 45 – 50 мм; вода водопровідна; добавки: суперпластифікатори «Coral MasterSILK», «MasterFIX», «РЕЛАМІКС»; протиморозні добавки «Sika Antifreeze», «Кріопласт СП15-1».

Для зважування матеріалів використовувалися ваги побутові. Формування циліндричних зразків здійснювалося за допомогою труб пластикових діаметром 106 мм, 76 мм і 56 мм, кубічних форм 300×300×300, кубічних форм двохотвірних 2 ФК-100 для стандартних випробувань бетону на міцність 100 × 100 × 100 мм.

Для сушки зразків використовувалися сушильні шафи СНОЛ 3,5.35.3,5/3М (потужність 2,5 кВт); СЕШ-3М (потужність 1,2 кВт). Для контролю температури застосовувалися хром-алюмінієві термомпари ТХА-VIII в комплекті з градуйованими омметрами і ртутним термометром для градуювання термомпар.

При атестації зразків використовувалася розривна машина Р-10. Для зменшення тертя торців зразка в розривній машині застосовувалася бязь технічна.

2.1.2. Устаткування для дослідження фізичних параметрів зразків до, під час і після нагрівання

Для дослідження теплофізичних характеристик зразків використовувалося таке обладнання:

- циліндричні зразки діаметром 100 мм, довжиною 300 мм;
- розривна машина Р-10;
- муфельна піч СНОЛ 1,6.2.0.0,8 / 9-М-1 (потужність 2 кВт);
- термомпари ТХА 1-27-К-2-І-320-ІNC-6-А (0–1100) °С, фольга алюмінієва (рис. 2.1.);
- термомпари хром-алюмінієві дротові (виготовлення і атестація фірма «ТЕРА» м. Чернігів;
- регулятор температури РТ1-06 (рис. 2.2.).

Для дослідження зразків при їх нагріванні під навантаженням використовувалося наступне обладнання:

- циліндричні зразки діаметром 56 мм і 76 мм, довжиною, відповідно, 100 мм і 200 мм;
- установка для випробування, що складається з муфельної печі (потужність 2,5 кВт) і гідравлічного преса, азбестова тканина для зменшення тертя між губками преса і зразками;
- термомпари ТХА 1-27-К-2-І-320-ІNC-6-А- (0 ... 1100) ° С, фольга алюмінієва (рис.2.1.);
- регулятор температури РТ1-06 (рис. 2.2.);
- стрілочний індикатор.



Рис. 2.1 – Термомпара ТХА 1-27-К-2-І-320-ІNC-6-А-(0...1100)°С.



Рис. 2.2 – Терморегулятор РТ1-06

2.1.3. Устаткування для дослідження структури зразків. Для дослідження структури зразків використовувалося таке обладнання:

- мікроскоп біологічний "Біолам-Д-11", пінцет очний (ГОСТ 21241-89Е);
- мікроскоп растровий електронний РЕМ 100У (SELMІ), спирт етиловий;
- ексікатор, бязь технічна (ГОСТ 8474-80).

2.2. Методика виготовлення бетонних зразків

Склад зразків відповідає важкому бетону на гранітному заповнювачі, який є найбільш поширеним для виготовлення несучих залізобетонних конструкцій, монолітно-каркасних споруд, а також дослідних зразків елементів конструкцій і моделей елементів конструкцій для натурних вогневих випробувань. Склад зразків в пропорціях по масі сухих матеріалів на 1 м³ був наступним: портландцемент марки «500» – 460 ± 10 кг; пісок кварцовий річковий – 660 ± 10 кг; щебінь гранітний – 1150 ± 10 кг; вода водопровідна – 165 ± 10 кг (В/Ц = 0,36).

Для вивчення впливу добавок в бетон на його теплофізичні характеристики виготовлялися чотири групи по 3 циліндричних зразка (див. рис. 2.3.) без добавок і з трьома типами добавок: суперпластифікатори «Coral MasterSILK» (4.5 літра на 1 м³), «MasterFIX» (4.5 літра на 1 м³); протиморозна добавка Sika Antifreeze (4.2 літра на 1 м³). Крупність гранітного заповнювача (щебеню) складала – 20–45 мм. Заповнювачі більшої крупності не застосовувалися через великий розкид результатів експерименту.

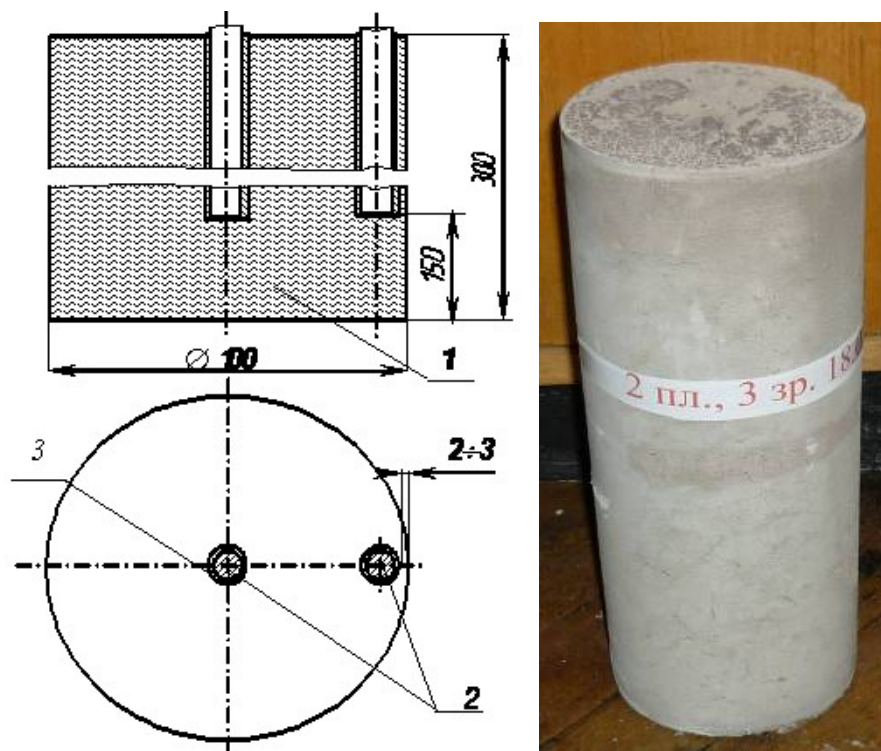


Рис. 2.3 – Геометрія і загальний вигляд зразка: 1 – зразок; 2 – термопара; 3 – металева фольга

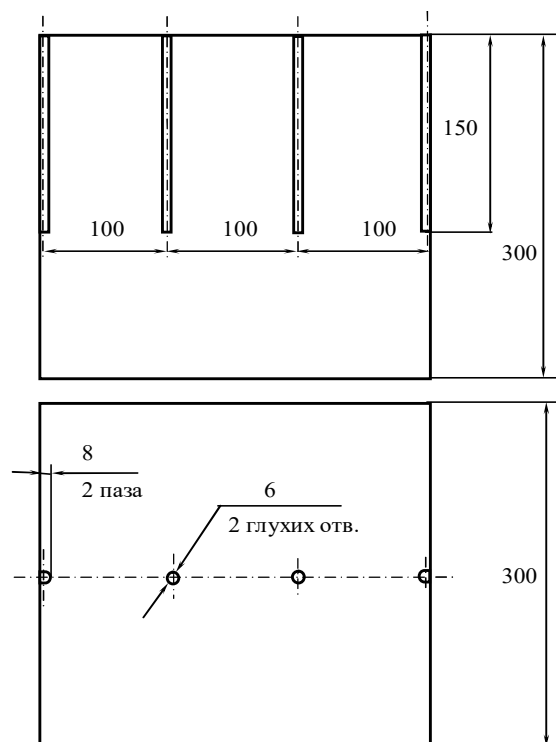
Формування зразків для визначення теплофізичних параметрів відбувалося за допомогою форм, виготовлених з пластикових труб діаметром 106 мм. При виготовленні зразків передбачалися глухі поздовжні отвори для термопар в геометричному центрі основ

циліндричного зразка і біля краю таким чином, щоб шар бетону між поверхнею термопар і повітрям становив 2-3 мм для усунення впливу різниці сприйняття теплового випромінювання поверхні зразка і термопар. Після формування зразки піддавалися операції штикування для ущільнення структури бетону. Твердіння відбувалося на повітрі протягом 28 діб. Після зразки піддавалися сушінню в сушильній шафі СНОЛ 3,5.35.3,5 / 3М протягом 3 годин при температурі 110 °С.

Для проведення експерименту по визначенню ТФХ з використанням стандартної температурної кривої пожежі виготовлялися зразки-куби 300×300×300 (див. рис. 2.4.) з бетону з таким же складом.



а)



б)

Рис. 2.4 – Зразок для дослідження: а) загальний вигляд; б) геометричні параметри.

Формування зразків відбувалося за допомогою форм, виготовлених з металевих кубів, що відповідають розмірам зразка. При виготовленні зразків передбачалися 4 глухі поздовжні отвори для термопар в центрі зразка так, щоб шар бетону між поверхнею термопар і повітрям становив 2-3 мм для усунення впливу теплового випромінювання між поверхнею зразка і поверхнею термопар. За допомогою цементного розчину перед кожним досвідом термопар ущільнювалися.

Для випробувань було виготовлено 3 партії по 3 зразка з різними добавками і без них.

- 1 партія бетон без добавок;

- 2 партія бетон з добавкою «РЕЛАМІКС» – 3 шт.;
- 3 партія бетон з добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1» – 3 шт.

Для випробувань бетону в умовах нагріву і стиснення були використані два типи зразків – кубічної і циліндричної форми.

Бетонна суміш для кубічних бетонних зразків мала аналогічний склад за основними компонентами. Зразок представляв собою куб розмірами 100×100×100 мм (див. рис. 2.6.). При цьому використовувалося таке обладнання:

- форма кубів 2 ФК-100 (двохотвірне) (рис. 2.6.);
- вібростол ВМ-6.4;
- СНОЛ 3,5.35.3,5 / 3М (потужність 2,5 кВт).



Рис. 2.5 – Зразки 100×100×100 мм для випробувань при нагріві і стиску



Рис. 2.6 – Форма кубів 2 ФК-100

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

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

Зразки виготовлялися з бетонного розчину як із застосуванням добавок, так і без них. Добавки до бетону: суперпластифікатор «РЕЛАМІКС» (дозування 1% від маси цементу); протиморозна добавка «Кріопласт СП15-1» (дозування 1,5% від маси цементу).

Всього було виготовлено 18 груп зразків по 3 шт. загальною кількістю 54 шт. Склад циліндричних зразків для випробувань при нагріванні під навантаженням був таким: портландцемент марки «500» – 460 ± 10 кг; пісок кварцовий річковий – 660 ± 10 кг; щебінь гранітний – 1150 ± 10 кг; вода водопровідна – 165 ± 10 кг; В/Ц = 0,36 без добавок із трьома типами добавок: суперпластифікатори «Coral MasterSILK» (4.5 літра на 1 м^3), «MasterFIX» (4.5 літра на 1 м^3); протиморозна добавка Sika Antifreeze (4.2 літра на 1 м^3). Формування зразків відбувалося за допомогою форм, виготовлених з пластикових труб діаметром 76 мм (партія 30 шт.) Після формування зразки піддавалися операції штикування. Твердіння відбувалося на повітрі протягом 28 діб. Після чого зразки піддавалися сушінню в сушильній шафі СНОЛ 3,5.35.3,5/3М протягом 3-х годин при температурі 110°C . На рис. 2.7. показані виготовлені циліндричні зразки в формах і форми без зразків в сушильній шафі СНОЛ 3,5.35.3,5/3М.



Рис. 2.7 – Циліндричні бетонні зразки діаметром 76 мм в формах і без форм в сушильній шафі СНОЛ 3,5.35.3,5/3М

2.3. Методика попередніх досліджень властивостей бетону

Основні механічні характеристики бетону визначалися відповідно до відомих методик [30-32]. Для визначення механічних характеристик використовувалися стандартні кубічні зразки $100 \times 100 \times 100$ мм (див. рис. 2.5.) і циліндричні зразки діаметром 76 мм, довжиною 200 мм. Випробування при короткочасних навантаженнях здійснювалися на випробувальному пресі П-500 і гідравлічній розривній машині Р-10 з автоматичною побудовою діаграми «навантаження-переміщення». З цієї діаграми визначалися міцність і початковий модуль Юнга. Параметри обирались при усередненні результатів випробувань 3-х зразків. Щільність зразків проводилася за допомогою гідростатичного зважування. Пористість зразків визначалася при зважуванні насичених водою і сухих зразків. При цьому використовувалися ваги побутові та ваги пружинні.

2.4. Методика дослідження нагріву зразків без навантаження

Для визначення теплофізичних параметрів – коефіцієнта теплопровідності і теплоємності використовувались дані, отримані при нагріванні циліндричних зразків діаметром 100 мм і довжиною 300 мм в муфельній печі СНОЛ 1,6.2.0.0,8/ 9-М-1. Установка в зборі для визначення теплофізичних характеристик бетонних зразків наведена на рис. 2.8.

Положення термопар дозволяє проводити зняття показань температури верхніх шарів і центру зразка. Зразок встановлюється в камеру муфельної печі. Режим нагріву простору камери визначався за допомогою термопар, встановленої в камері. Показання термопар, відповідно до [59], знімалися з приладу РТ1-06 (рис. 2.3.) Отримані показники температури дозволили визначити коефіцієнт теплопровідності і теплоємність за допомогою розв'язання оберненої задачі теплопровідності. Випробування проводилися на базі навчально-випробувальної лабораторії будівельних конструкцій і матеріалів Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.



Рис. 2.8 – Експериментальна установка в зборі

Для розрахунку температурного режиму в камері при нагріванні зразків під навантаженням необхідно визначення коефіцієнта теплообміну. Ефективний коефіцієнт теплообміну визначається як константа при використанні середнього арифметичного результату розрахунків згідно температурним кривим, знятим з термопар в камері печі і в поверхневих шарах зразків.

Полігональні дослідження режимів прогріву зразків проводилися при вогневому випробуванні за допомогою спеціальної печі. Схема випробувальної установки представлена на рис. 2.9.

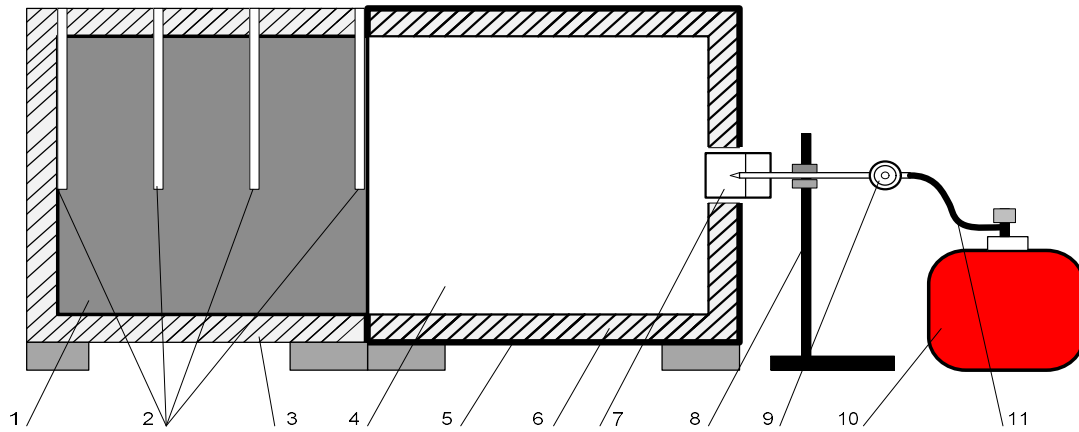


Рис. 2.9 – Експериментальна установка для вогневих випробувань бетонних зразків: 1 – зразок для дослідження, 2 – місця установки термопар; 3 – теплоізоляція зразка; 4 – камера теплового впливу печі; 5 – корпус печі; 6 – теплоізоляція камери теплового впливу печі; 7 – газовий пальник; 8 – штатив; 9 – регулятор подачі газу; 10 – балон з горючим газом; 11 – трубка подачі палива

Металева піч представляє собою куб (без стінки з одного боку), виготовлена зі сталі і має розміри 3200x3200x3000 мм. На протилежному боці передбачено отвір діаметром 50 мм. Усередині печі знаходиться кріплення для теплоізоляції. Нагрівання зразків проводиться через отвір за допомогою газового пальника ГВ «ДОНМЕТ» 231 (7, рис. 2.11.). Інтенсивність подачі газу змінювалася за допомогою регулятора (9, рис. 2.11.), яким підтримувався необхідний температурний режим під час проведення випробування. Пальник складається з стовбура, з'єднаного з гумовим шлангом (рукавом), який в свою чергу з'єднаний з газовим балоном. Горючий газ надходить в пальник по рукаву (тип I по ГОСТ 9356-75) через ніпель, вентиль, патрубок в інжектор. Горючий газ змішується з повітрям всередині мундштука, утворюючи горючу суміш. Процес випробувань показаний на рис. 2.10.



Рис. 2.10 – Процес теплових полігональних випробувань

Під час досліду вимірювалася і реєструвалася температура в камері теплової дії печі і в 4-х місцях зразка (рис. 2.9.) З інтервалом не більше 1 хв. Одночасно проводилося спостереження за цілісністю зразка.

Для вимірювання температури в печі використовувалися термопари з діаметром проводу 1,5 мм (рис 2.12.) типу ТХА (по ГОСТ 3044-84), які можна використовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1100 °С.

Для зняття цифрових значень температури в місцях установки термопар використовувалися вторинні електронні прилади Digital Multimeter Dt830b, які підключені до термопар. Діапазон вимірювання температур даного приладу складає від -20°C до 1370°C. Похибка становить $\pm 1.0\%$.

Випробування проходило на відкритому майданчику при ясній безвітряній погоді в наступній послідовності.

1. Підготовчі процедури:

- монтаж термопар в бетонному зразку в кількості 4 шт., встановлюються за 2 дні до випробування;
- збірка установки, приєднання пальника до балона, установка пальника на штатив;
- установка зразка, ретельна теплоізоляція зразка з обладнанням отворів для виходу продуктів горіння;
- монтаж вимірювальних приладів до термопар і їх налаштування.

2. Проведення експерименту:

- відкривається вентиль на балоні і відкривається подача газу на пальнику за допомогою регулятора, підпалюється газ;
- пальник встановлюється в отворі, включається секундомір, перевіряється чутливість вторинного приладу термопари, яка знаходиться в середині печі;
- за допомогою регулятора на першій хвилині і надалі підтримується температурний режим максимально близький до стандартного згідно ДСТУ Б В.1.1-4-98 в контрольній точці часу (кожні 15 с.);
- знімаються показники через кожну хвилину з п'яти приладів і заносяться до протоколу протягом 2 годин нагрівання.

3. Закінчення експерименту:

- охолодження зразка, візуальне дослідження поверхні випробуваного зразка з фото фіксацією;
- розбирання установки;
- обробка отриманих результатів.

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4-98. під час проведення випробування середня об'ємна температура в печі T_f повинна змінюватися за стандартним температурним режимом, який визначається залежністю (1.3). На рис. 2.11. наведено графік стандартного температурного режиму, який дотримувався в печі за допомогою регулювання інтенсивності подачі палива вентилем 9 (рис. 2.9.) на газовому пальнику, шляхом контролю відповідності значень за таблицею значень,

знайдених по формулі (1.3) і показників вторинного приладу термометри, що знаходилася в камері вогневого впливу. Відхилення не перевищували допустимих значень.

Допустимі відхилення d середньої температури в печі T_f від стандартного температурного режиму не перевищували таких значень:

а) $\pm 15\%$ для $0 < t \leq 10$

б) $\pm 15 - 0,5(1-10) \%$ для $10 < t \leq 10$

в) $\pm 5 - 0,083(t - 30) \%$ для $30 < t \leq 60$

г) $\pm 2,5\%$ для $t > 60$

Відхилення d розраховувались по формулі:

$$d = \frac{T_f - T_s}{T_s} \cdot 100\% \quad (2.2.)$$

Під час випробувань зразків, які виконані з негорючих матеріалів, на окремих термометрах після 10 хв. випробування допускаються відхилення температури від стандартного температурного режиму не більше ніж на 100°C .

З метою отримання достовірних результатів експерименту і створення необхідних умов прогріву бетону під з боку камери вогневого впливу і сам випробовуваний зразок теплоізолювали так, як вказано на рис 2.9. (3 і 6). В якості теплоізоляції при випробуванні застосовувався утеплювач БестІзол типу А, виготовлений з мінераловати, який має оптимальні параметри за умови вогневого впливу.

2.5. Методика дослідження нагріву зразків під навантаженням

При вивченні механічних властивостей зразків в умовах одночасного впливу нагріву та механічного навантаження проводилося два типи випробувань: випробування зразків-кубів при послідовному нагріванні і стисненні в нагрітому стані; випробування циліндричних зразків при їх одночасному нагріванні і стисненні.

2.5.1. Методика випробувань кубічних зразків

Виготовлені зразки випробовувалися в муфельній печі по 1 зразку за 1 цикл нагріву. Піч муфельна СНОЛ-16/1250 оснащена пристроєм витяжки продуктів згоряння, максимальна температура 1050°C , потужністю 2,2 кВт.

Для кожної з груп зразків передбачалися особливі температурні режими прогріву камери печі (табл. 2.1.). Температура вимірювалася за допомогою ртутного термометра з діапазоном до 800°C .

Після нагріву зразки піддавалися випробуванню на міцність. Навантаження зразків здійснювалося на гідравлічному пресі ПП-500, який призначений для статичних випробувань на стиск стандартних зразків бетонів з найбільшим граничним навантаженням 500 кН.

Протягом усього випробування на стиск фіксувалося значення навантаження в момент руйнування зразка, а також деформації в різні моменти навантаження.



Рис. 2.11 – Випробувальний прес ІП-500

Режими нагріву зразків і особливості статичного випробування на стиснення кубічних зразків наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Режими нагріву зразків і порядок випробування на стиск

№	Склад	Кількість зразків	Вид випробувань
1.1	Бетон без добавок	3 шт.	Стандартні дослідження на стиск (з побудовою діафрагми деформації)
1.2	Бетон без добавок	3 шт.	Стандартні дослідження на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 500°C 20 хв. і подальшого охолодження (вн. 100°C)
1.3	Бетон без добавок	3 шт.	Стандартні дослідження на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 500°C 45 хв. і подальшого охолодження (вн. 300°C)
1.4	Бетон без добавок	3 шт.	Стандартні дослідження на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 700°C 50 хв. і подальшого охолодження (вн. 500°C)
1.5	Бетон без добавок	3 шт.	Стандартні дослідження на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 900°C 90 хв. і подальшого охолодження (вн. 700°C)
1.6	Бетон без добавок	3 шт.	Стандартні дослідження на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 900°C 120 хв. і подальшого охолодження. (вн. 800°C)

Продовження таблиці 2.1.

2.1	Бетон з добавкою №1*	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації)
2.2	Бетон з добавкою №1*	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 500°C 20 хв. і подальшого охолодження (вн. 100°C)
2.3	Бетон з добавкою №1*	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 500°C 45 хв. і подальшого охолодження (вн. 300°C)
2.4	Бетон з добавкою №1*	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 700°C 50 хв. і подальшого охолодження (вн. 500°C)
2.5	Бетон з добавкою №1*	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 900°C 90 хв. і подальшого охолодження (вн. 700°C)
2.6	Бетон з добавкою №1*	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 900°C 120 хв. і подальшого охолодження. (вн. 800°C)
3.1	Бетон з добавкою №2**	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації)
3.2	Бетон з добавкою №2**	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 500°C 20 хв. і подальшого охолодження (вн. 100°C)
3.3	Бетон з добавкою №2**	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 500°C 45 хв. і подальшого охолодження (вн. 300°C)
3.4	Бетон з добавкою №2**	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 700°C 50 хв. і подальшого охолодження (вн. 500°C)
3.5	Бетон з добавкою 2**	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 900°C 90 хв. і подальшого охолодження (вн. 700°C)
3.6	Бетон з добавкою 2**	3 шт.	Стандартні досліді на стиск (з побудовою діафрагми деформації), після нагріву, витримки зразка при 900°C 120 хв. і подальшого охолодження. (вн. 800°C)

* – Добавка №1 суперпластифікатор «РЕЛАМІКС»;

** – Добавка №2 протиморозна добавка «Кріопласт СП15-1».

2.5.2. Методика випробувань циліндричних зразків

Для дослідження міцності і деформованих властивостей бетону при його нагріванні під стиском навантаження використовувалися бетонні зразки 76 мм.

Випробування відбувалися за допомогою спеціально зібраної установки, що складається з муфельної печі і гідравлічного преса механічної дії для створення постійного стискаючого навантаження. Схема установки приведена на рис. 2.12.

Муфельна піч виготовлена у вигляді труби з муфелем зі сталі для рівномірного нагріву зразка. Параметри печі наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Параметри муфельної печі установки

№	Параметр	Одиниці виміру	Величина
1.	Потужність	кВт	2,5
2.	Максимальна температура нагріву простору камери	°С	900
3.	Об'єм робочої камери	см ³	350
4.	Діаметр перетину камери	мм	150
5.	Габаритні розміри:		
	діаметр	мм	600
	довжина	мм	350
6.	Максимальна швидкість нагріву камери	°С/хв.	19

Прес призначений для здійснення постійного стискаючого навантаження, що моделює відповідне навантаження на елемент в залізобетонній колоні. Для цього найбільше підходить прес гідравлічної дії, де навантаження здійснюється за допомогою гідроциліндра. Величина навантаження визначається за показниками манометра, який контролює тиск в робочій камері гідроциліндра.

Після складання установки разом із зразком для випробування відбувається нагрівання та охолодження зразка згідно з попередньо розрахованими режимами, відповідними температурними режимами нагріву і охолодження внутрішніх шарів колони при використанні стандартної температурної кривої пожежі.

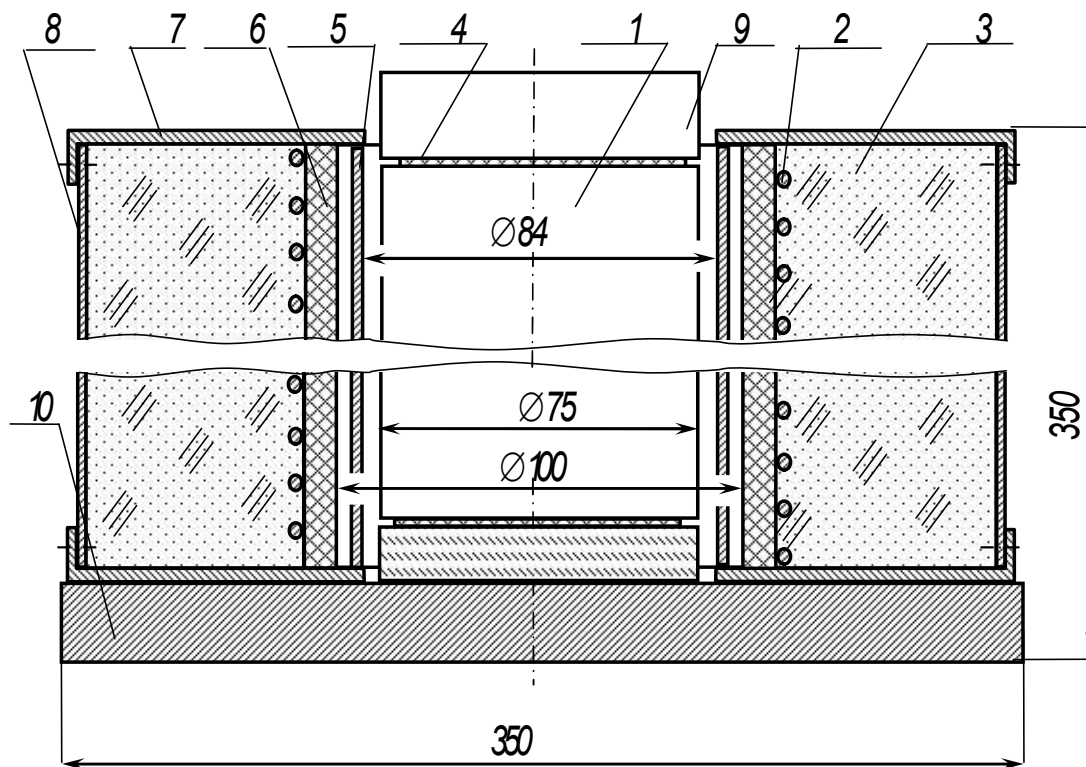


Рис. 2.12 – Схема установки для випробування зразків під навантаженням:
 1 – зразок; 2 – ніхромова спіраль; 3 – азбесто-шамотна засипка; 4 – азбестова тканина; 5 – сталевий муфель; 6 – стінка вогнетривкої камери; 7 – кришка; 8 – кожух печі; 9 – шарнірна губка преса; 10 – основа

Завдання полягає у визначенні такого режиму нагріву камери печі, щоб температура зразка співпадала з режимом нагріву відповідного шару з урахуванням феноменології його поведінки при цьому. Режим нагріву шарів визначався розрахунковим шляхом з урахуванням стоку теплоти за рахунок руху і випаровування води, а також фазових переходів при дегідратації клінкерних мінералів [53, 54, 73-76].

Випробування проводилися при повному циклі нагрівання та охолодження зразка. При руйнуванні зразка експеримент припинявся. Цілі зразки після нагрівання підлягали випробуванням на розривній машині в режимі стиснення, в ході яких вимірювалися їх міцність і деформації в момент руйнування.

Загальний вигляд установки наведено на рис. 2.13.



Рис. 2.13 – Установка для комбінованих випробувань циліндричних бетонних зразків

2.5.3. Методика реалізації теплових режимів нагріву зразків

Для реалізації випробувань зразків за методикою пп. 2.5.2. необхідна відповідність прогріву серединної точки циліндричного зразка розрахованому режиму. Для цього необхідно підібрати відповідний режим прогріву камери муфельної печі. При виконанні досліджень згідно п. 2.4. за визначенням теплофізичних параметрів визначається коефіцієнт теплообміну між поверхнею зразка і простором камери печі.

При відомих теплофізичних параметрах зразків і коефіцієнтів теплообміну підбирається режим прогріву камери печі. Режим прогріву камери печі здійснюється за допомогою керуючого пристрою РТ1-06 (див. рис. 2.2). Підбір режиму здійснювався на основі методики, запропонованої в [59]. Режими прогріву муфельної печі, визначені за методикою [59] та наведені на рис. 2.14.

Отриманий режим можна легко реалізувати за наявності прецизійного електронного керуючого пристрою РТ1-06. Для здійснення нагріву по розрахованому режиму потрібно виконати такі операції: нагрів камери печі до температури 160 °С; встановлення туди зразка, витримка його повинна бути при температурі 160 °С протягом 6 хв.; перемикання на режим нагріву зі швидкістю 30 °С/ хв. і нагрів до температури 320 °С; витримка зразка при температурі 320 °С за 1,6 хв. При реалізації такого режиму нагрівання максимальне відхилення становить 19,7 °С.

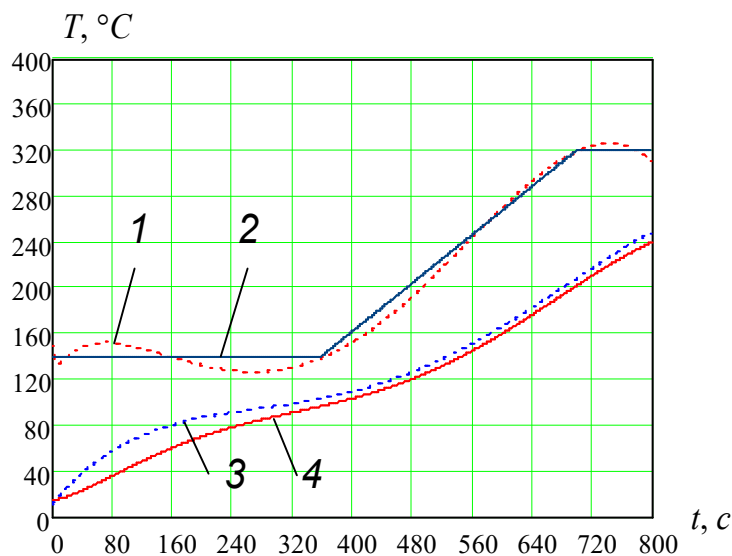


Рис. 2.14 – Режим нагріву камери муфельної печі: 1 – розрахований згладжений режим прогріву камери печі; 2 – частково-лінійна апроксимація розрахованого режиму прогріву камери для його технічної реалізації; 3 – заданий режим прогріву; 4 – режим прогріву середини зразка при технічній реалізації нагріву камери печі по режиму, відповідної кривої 2

Режим охолодження не розраховується. Зразок при охолодженні вистигає разом з піччю. При цьому режим охолодження середини зразка розраховується рішенням прямої задачі рівняння Фур'є.

Таким чином, нагрів зразків можна легко здійснити за допомогою наявних нагрівальних і керуючих пристроїв. Режим нагріву розраховується рішенням ОЗТ управління, за допомогою методу автоматизованого підбору.

Підсумовуючи все вище сказане, можна узагальнити:

- об'єктами для вивчення є зразки з важкого бетону на гранітному заповнювачі (щебені) з використанням спеціальних добавок і без них, циліндричні – $\varnothing 100 \times 300$ і $\varnothing 76 \times 200$; кубічні $100 \times 100 \times 100$, і $300 \times 300 \times 300$;
- основні дослідження бетонних зразків відбуваються за допомогою установки, що комбінує нагрів і статично стискає навантаження і складається з муфельної печі і преса гідравлічної дії;
- для попереднього дослідження теплофізичних параметрів зразків використовується муфельна піч, де відбувається їх високотемпературний нагрів і охолодження з фіксацією температури в поверхневих і внутрішніх шарах;
- для отримання достовірних результатів теплофізичних характеристик максимально близьких до реальних був проведений ряд вогневих випробувань для габаритних зразків ($300 \times 300 \times 300$);
- для попереднього і заключного дослідження зразків після нагріву використовується розривна машина і гідравлічний прес;
- використані методи растрової електронної та електронної мікроскопії для дослідження впливу комбінованої дії нагріву і стиску навантаження на внутрішню структуру зразків.

РОЗДІЛ III

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАТОРІВ НА ПОВЕДІНКУ БЕТОНУ ПРИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ НАГРІВУ

3.1. Попередні дослідження механічних властивостей бетонних зразків

При дослідженні впливу, що можуть мати добавки в бетоні на їх властивості при нагріванні, були проведені попередні дослідження структурних і механічних властивостей бетону. При дослідженні механічних властивостей бетону при нормальних температурах розглядалися його міцність і деформація. Дослідження здійснювалися при механічних випробуваннях циліндричних зразків діаметром 100 мм, довжиною 200 мм за допомогою розривної машини Р-10 і кубічних зразків 100×100×100 мм на випробувальному пресі ПП-500. При цьому на циліндричних зразках вивчався вплив суперпластифікаторів «Coral MasterSILK», «MasterFIX» і протиморозної добавки «Sika Antifreeze», а на кубічних зразках вплив суперпластифікатора «РЕЛАМІКС» і проти морозної добавки «Кріопласт СП15-1». Результати випробувань наведені на рис. 3.1. та рис. 3.2.

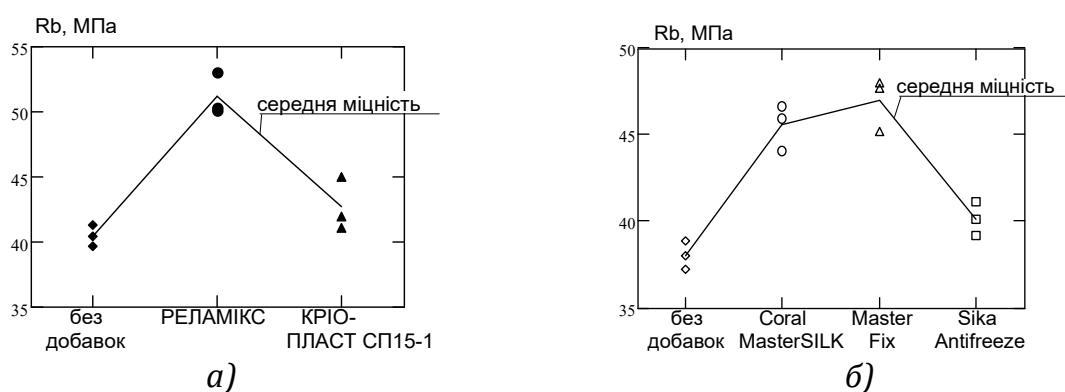


Рис. 3.1 – Міцність бетону з добавками кубічних зразків (а) і циліндричних зразків (б)

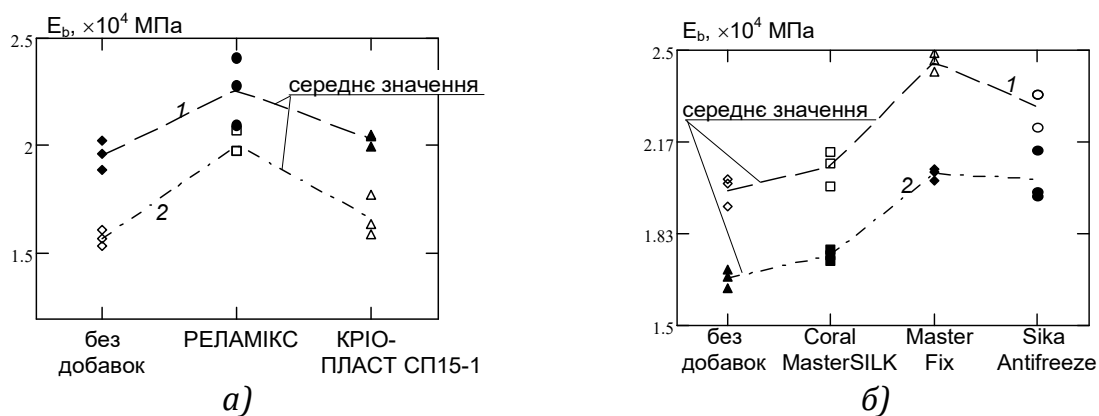


Рис. 3.2 – Значення модулів пружності кубічних (а) і циліндричних зразків (б) модулів пружності в залежності від виду модифікуючої добавки: 1 – початковий модуль пружності; 2 – умовний модуль пружності

Дослідження механічних характеристик бетону з добавками, які модифікуються показало, що наявність суперпластифікаторів помітно покращують міцність бетону, при цьому не надаючи істотної зміни деформованих властивостей. Найбільшою міцністю володіє бетон з добавкою «РЕЛАМІКС».

При вивченні структурних властивостей бетону була досліджена щільність зразків за допомогою зважування. На рис. 3.3. показані показники щільності досліджуваних зразків.

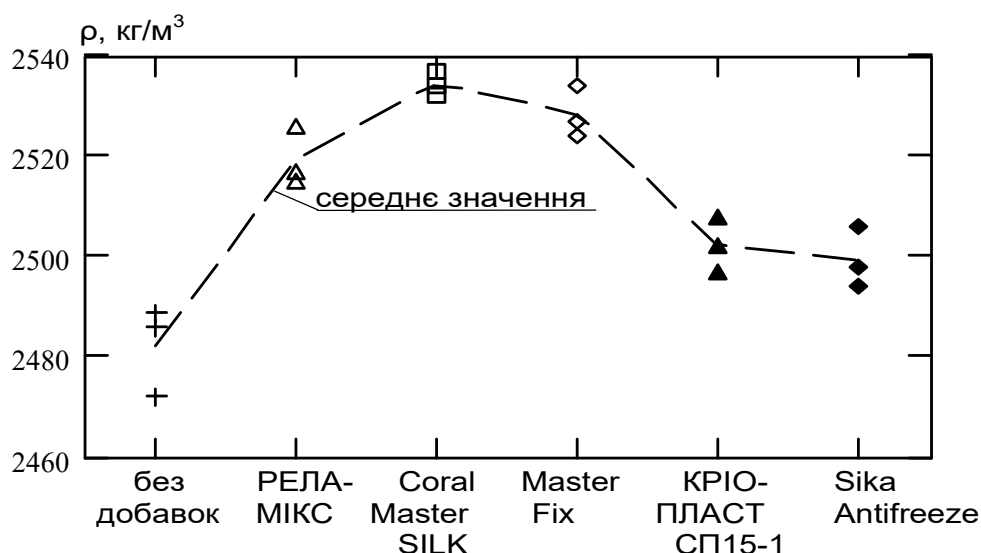


Рис. 3.3 – Щільність бетону з добавками

Результати досліджень показують, що модифікований бетон істотно ущільнюється, а це не суперечить відомим даним [42, 49].

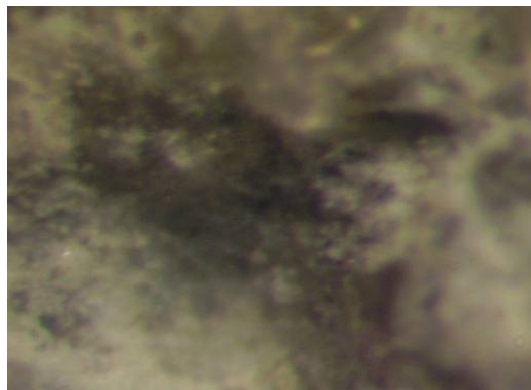
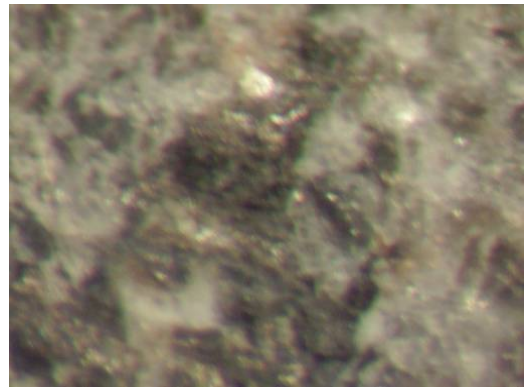
3.2. Попередні дослідження структурних властивостей бетонних зразків

Аналіз структури зразків проводиться за допомогою оптичної та растрової електронної мікроскопії. Характерна структура зразків показана на мікрофотографіях (рис. 3.4.). Дані фотографії показують суцільну пористу структуру цементного каменю як поблизу, так і на відстані від країв крупного заповнювача.

Внутрішня структура бетону проявляється при дослідженні шарів бетону за допомогою растрової електронної мікроскопії. Знімки отримані на базі обладнання міжкафедральної лабораторії матеріалознавства Черкаського державного технологічного університету.



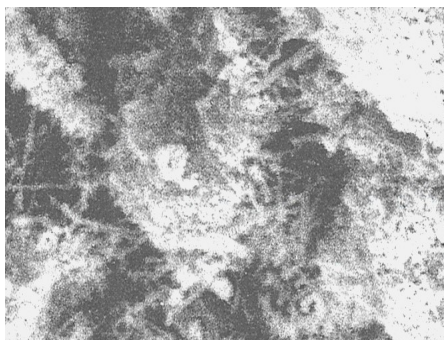
а)



б)

Рис. 3.4 – Мікрофотографії структури зразків до нагрівання:
а) – структура цементного каменю біля краю великого заповнювача;
б) – структура цементного каменю

На знімках (див. рис. 3.5.), отриманих на скануючому електронному мікроскопі РЕМ 100У, видно структуру зразків цементного каменю бетону з модифікуючими добавками і без них до нагрівання. Аналіз мікрофотографій показує, що цементний камінь бетону з добавками має меншу пористість і більш дрібнозернисту структуру.



а)



б)

Рис. 3.5

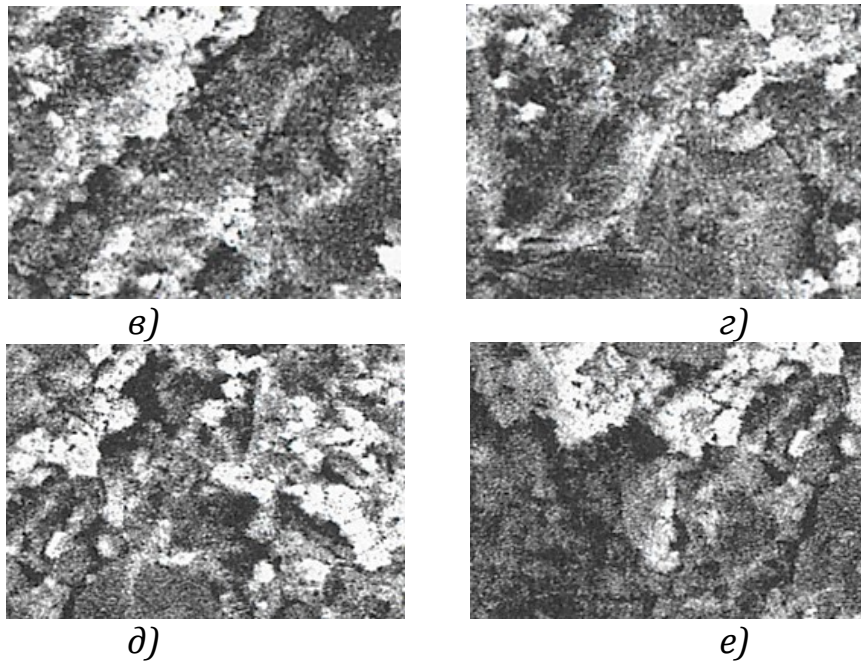


Рис. 3.5 – Мікроструктура зрізів зразків бетону з добавками до нагрівання, отримана на скануючому електронному мікроскопі РЕМ 100У при розширенні $\times 500$: а) – бетон без добавок; б), в), з) – бетон з суперпластифікаторами «РЕЛАМІКС», «Coral MasterSILK» і «MasterFIX» відповідно; д), е) – з протиморозними добавками «Кріопласт СП15-1», «Sika Antifreeze» відповідно

3.3. Дослідження властивостей модифікованого бетону при його нагріванні без навантаження при лабораторних випробуваннях

Для дослідження прогріву були використані циліндричні зразки, описані в п. 2.2. з бетону із суперпластифікаторами «Coral MasterSILK», «MasterFIX» і протиморозною добавкою «Sika Antifreeze». Методика проведення експерименту наведена в п. 2.4. При проведенні експериментів основними показниками, які вимірювалися були температури прогріву внутрішніх шарів зразків. Режими нагріву вибиралися виходячи з середніх швидкостей прогріву залізобетонної балки, складових $6-7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. На рис. 3.6. – 3.9. наведені результати експериментів.

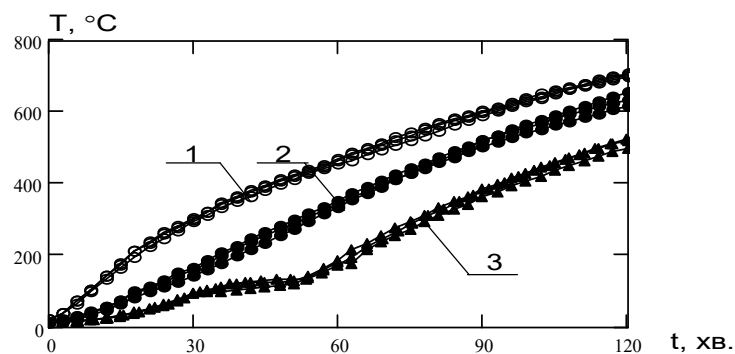


Рис. 3.6 – Прогрів зразка з бетону без добавок: 1 – камера печі; 2 – поверхня; 3 – середина

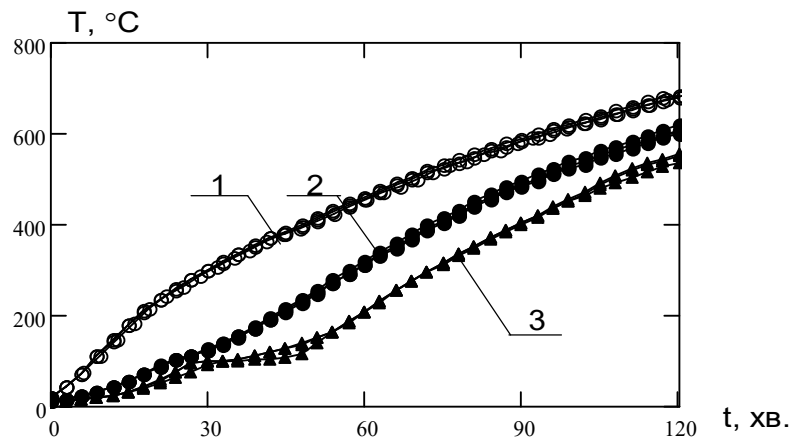


Рис. 3.7 – Прогрів зразка бетону з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»:
1 – камера печі; 2 – поверхня; 3 – середина

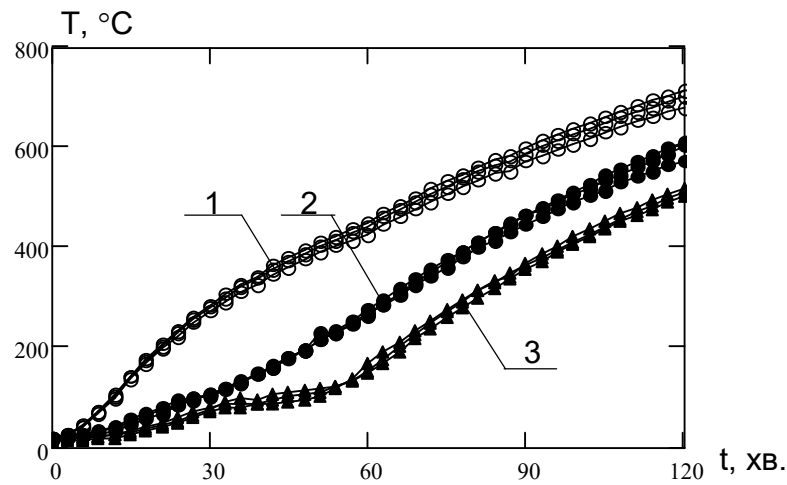


Рис. 3.8 – Прогрів зразка бетону з суперпластифікатором «MasterFIX»:
1 – камера печі; 2 – поверхня; 3 – середина

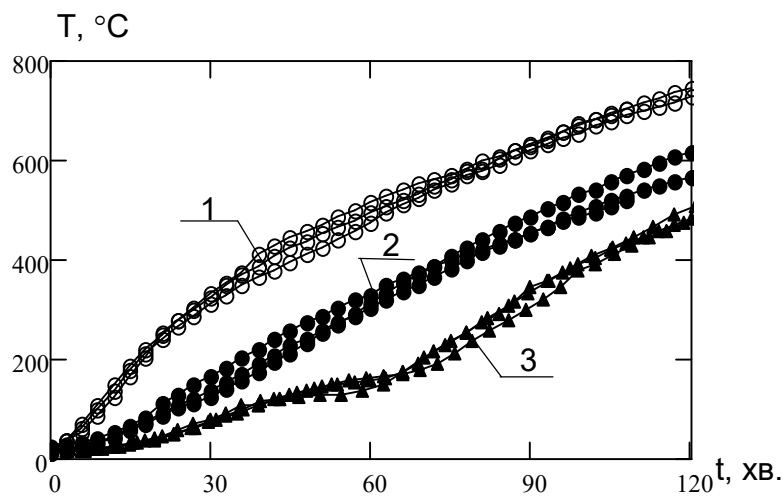


Рис. 3.9 – Прогрів зразка бетону з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»:
1 – камера печі; 2 – поверхня; 3 – середина

Нагрівання зразків модифікованого бетону супроводжувалося візуальними ефектами, які пов'язані з хімічними реакціями термічної деструкції цементного каменю. При цьому умовно можна виділити кілька етапів. Характерні явища, що відбуваються при нагріванні зразків наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Візуальні ефекти при нагріванні зразків модифікованого бетону

Етап нагріву	Інтервал температур, °С	Візуальний ефект
1 етап	20 – 90	Візуальні ефекти відсутні
2 етап	90 – 120	Інтенсивне випаровування вільної вологи із пор бетону. Температура середини зразка зі збільшенням температури його поверхні практично не зростає
3 етап	120 – 300	Подальше випаровування вільної вологи. При цьому температура всередині продовжує зростати
4 етап	300 – 500	Інтенсивне виділення із пор бетону газу бурого кольору з характерним запахом з осіданням його на поверхні зразка
5 етап	500 – 800	Продовження виділення із пор бурого газу з інтенсивним утворенням візуальної структури із тріщинами на поверхні зразка

Візуальні ефекти, характерні для зразків з модифікованого бетону, показані на рис. 3.10.

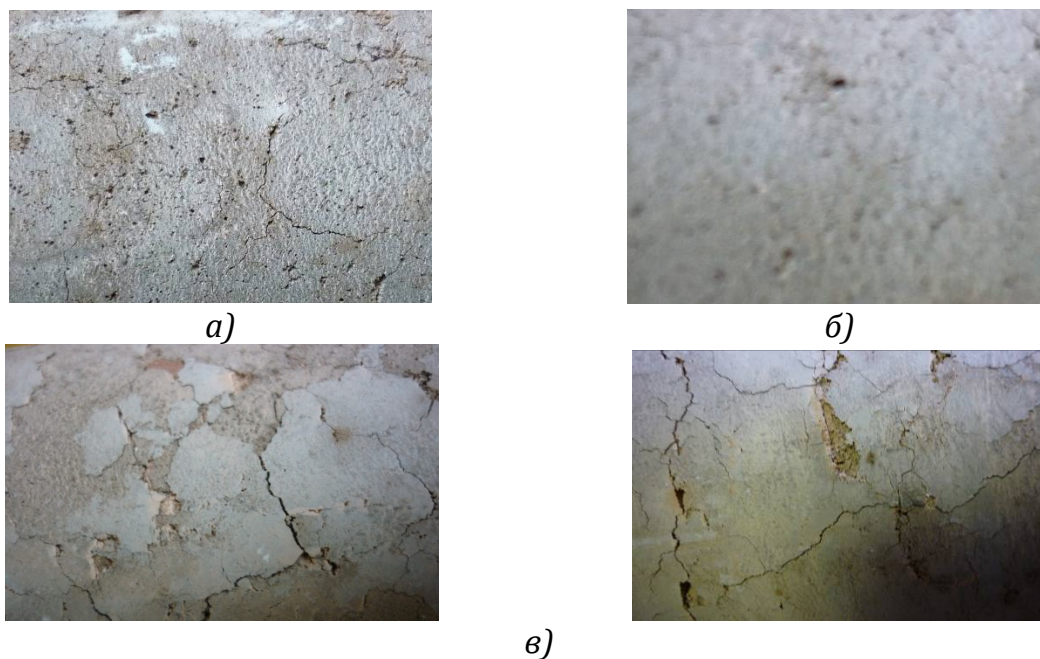


Рис. 3.10 – Візуальні ефекти етапів нагрівання: а, б – бурий наліт на поверхні зразків з суперпластифікаторами «Coral MasterSILK» і «MasterFIX» відповідно; в – візуальна структура із тріщинами

Для оцінки швидкостей прогріву внутрішніх шарів зразків були побудовані графіки середніх швидкостей прогріву внутрішніх шарів зразків. Побудовані графіки показані на рис 3.11.

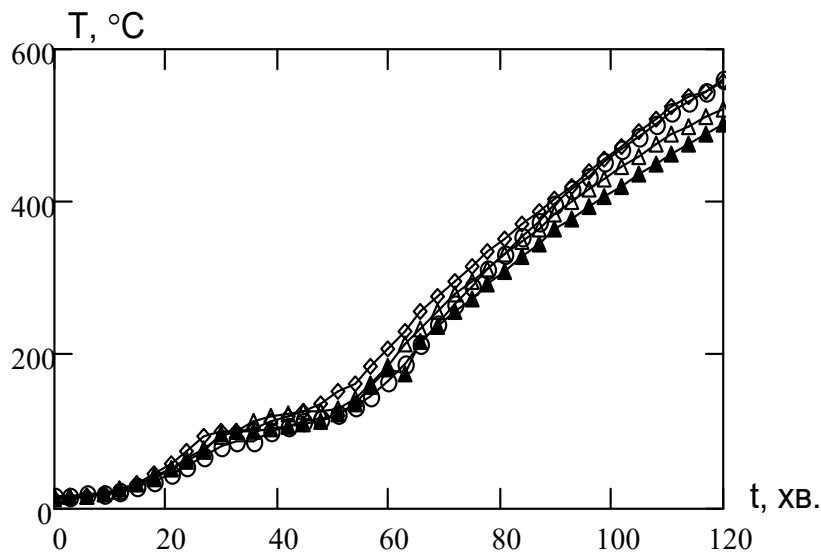


Рис. 3.11 – Середні температури прогріву середин зразків:
▲▲▲ – бетон з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»;
⊖⊖⊖ – бетон з суперпластифікатором «MasterFIX»; ◆◆◆ – бетон з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
■ – бетон без добавок

Аналіз графіків прогріву показав, що зразки з добавками прогріваються значно швидше ніж зразки бетону без добавок. До того ж наростання швидкості прогріву відбувається на останніх трьох етапах, коли очевидно відбуваються процеси деструкції модифікованого цементного каменю. Це можна пояснити слабким екзотермічним ефектом при його розкладанні.

Для більшого вивчення даних ефектів було вироблено додаткове діагностування структури цементного каменю на зрізах випробуваних зразків за допомогою растрової електронної мікроскопії. На рис 3.12. наведені знімки мікроструктури зразків з модифікованого бетону.

На знімках видно, що мікроструктура модифікованого бетону покрита продуктами термічної деструкції цементного каменю, що підтверджує можливість впливу екзотермічних ефектів на швидкість прогрівання модифікованого бетону.

Таким чином, як основний результат досліджень можна виділити помітне збільшення швидкості прогріву модифікованого бетону в порівнянні з бетоном без добавок, що в свою чергу говорить про можливе зниження вогнестійкості залізобетонних конструкцій, зроблених на його основі.

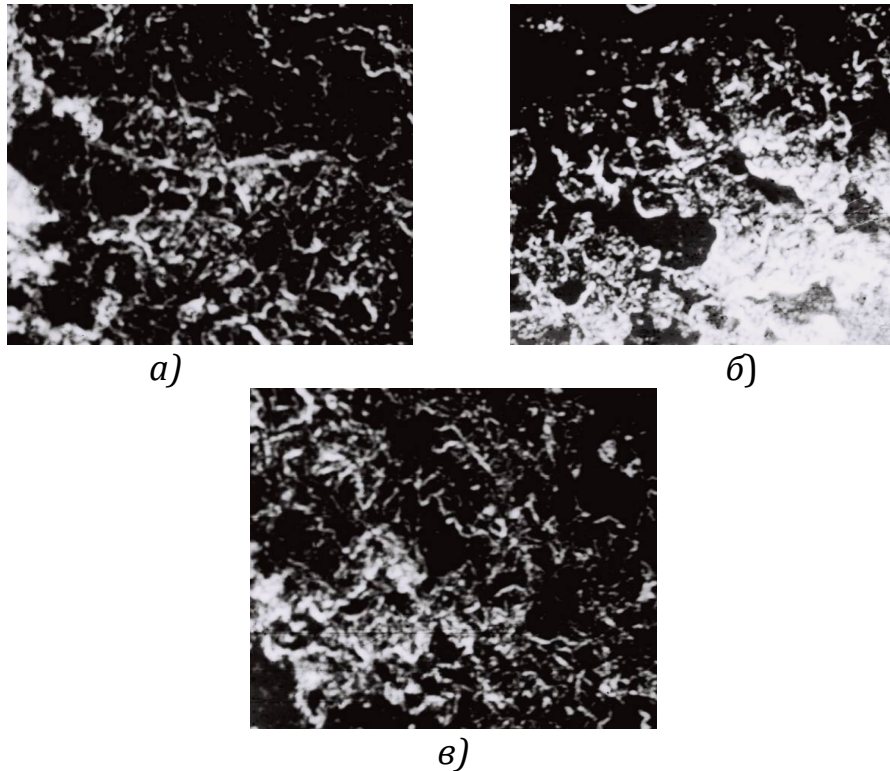


Рис. 3.12 – Мікроструктура зрізів зразків бетону з добавками до нагрівання, отримана на скануючому електронному мікроскопі РЕМ 100У при розширенні $\times 500$: а, б – бетон з суперпластифікаторами «Coral MasterSILK» і «MasterFIX» відповідно; в – з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

3.4. Дослідження властивостей модифікованого бетону при його нагріванні без навантаження при вогневих випробуваннях

Для дослідження прогріву були використані зразки-куби бетону $300 \times 300 \times 300$ (див. рис. 2.4.) з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС» і протиморозною добавкою «Кріопласт СП15-1». Методика проведення експерименту описана в п. 2.4.

При випробуваннях були отримані режими прогріву внутрішніх шарів зразків, які показані на рис. 3.13.

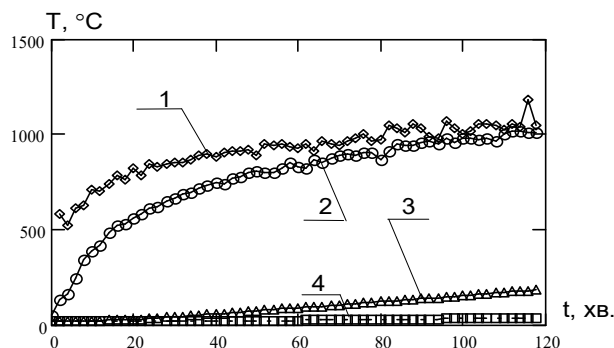


Рис. 3.13 – Середні температури прогріву шарів зразків з бетону без добавок:
 1 – температура камери печі; 2 – температура поверхневого шару (термопара № 1); 3 – температура на рівні термопару № 2;
 4 – температура на рівні термопару № 3

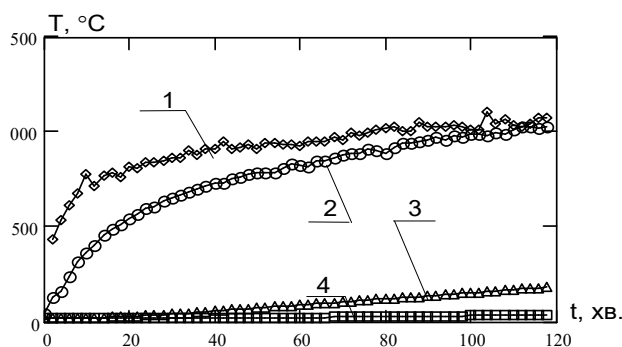


Рис. 3.14 – Середні температури прогріву шарів зразків бетону з добавкою РЕЛАМІКС: 1 – температура камери печі; 2 – температура поверхневого шару (термопара № 1); 3 – температура на рівні термопари № 2; 4 – температура на рівні термопари № 3

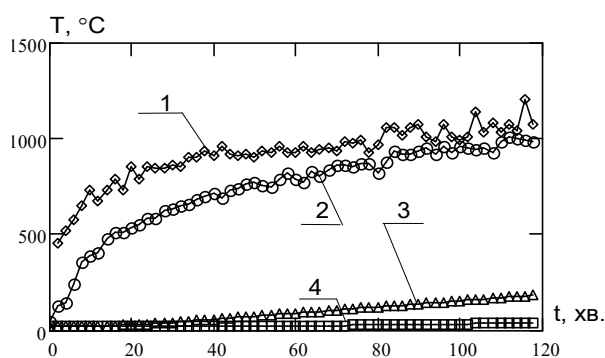


Рис. 3.15 – Середні температури прогріву шарів зразків бетону з добавкою Криопласт СП15-1: 1 – температура камери печі; 2 – температура поверхневого шару (термопара № 1); 3 – температура на рівні термопари № 2; 4 – температура на рівні термопари № 3

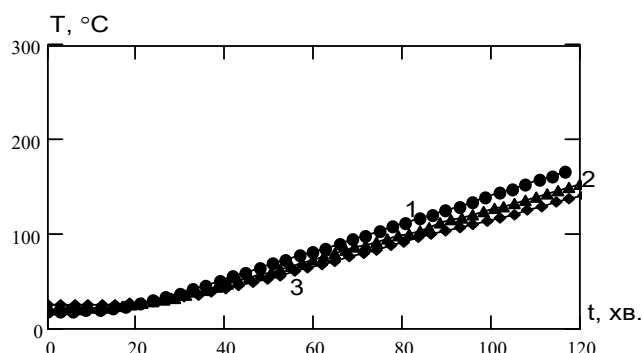


Рис. 3.16 – Температури прогріву шарів зразків з бетону на рівні термопари № 2: 1 – з добавкою РЕЛАМІКС; 2 – з добавкою Криопласт СП15-1; 3 – без добавок

Аналіз отриманих даних також показав, що зразки з добавками прогріваються значно швидше ніж зразки з бетону без добавок.

Оскільки проведені результати показують, що наявність добавок істотно впливає на режими прогріву зразків, необхідно провести додаткові дослідження впливу добавок в бетоні на вогнестійкість залізобетонних конструкцій.

3.5. Дослідження теплофізичних властивостей модифікованого бетону

3.5.1. Математичне забезпечення для ідентифікації теплофізичних властивостей модифікованого бетону

Для проведення ідентифікації ТФХ бетону зразків необхідно, спираючись на отримані експериментальні дані, вирішити ОЗТ. Дане завдання належить до класу математично некоректних задач [118]. Такі завдання вирішуються чисельно при наявності попередньої інформації, що звужує область пошуку. Згідно сучасних підходів [118, 119], найбільш ефективними є екстремальні методи, отримані моделі теплопередачі і теплообміну і алгоритми їх чисельної реалізації розглядаємо окремо – як «чорний ящик». Це дозволяє багато в чому спростити розрахунки і підвищити їх ефективність.

Для вирішення ідентифікації ТФХ модифікованого бетону, обраний інженерний метод вирішення ОЗТ, запропонований в [118]. Даний метод має економічну чисельну реалізацію, яка багато разів ефективно застосовувалася для вирішення технічних завдань, пов'язаних з теплообміном при пожежі [118]. Крім цього він не пов'язаний з видом математичної моделі і фізичним змістом шуканих характеристик.

Застосовуваний метод заснований на мінімізації цільового функціонала виду [118]:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i (T_{\text{Э}i} - T_{\text{P}i})^2}, \quad (3.1)$$

де $T_{\text{Э}i}$ – експериментальне значення температури в середині зразка;

$T_{\text{P}i}$ – розраховане значення температури в середині зразка в вузловій точці, що відповідає певному часу.

При ідентифікації теплофізичних характеристик (ТФХ) застосовуються ітераційні процедури відповідно до методу Ньютона-Гаусса. При цьому на кожній ітерації знаходиться вектор збільшення оптимізуючих параметрів відповідно до виразу [118]:

$$\{\mathbf{P}^{l+1}\} = \{\mathbf{P}^l\} + \beta^l \cdot \{\Delta \mathbf{P}^l\}, \quad (3.2)$$

де $\{\Delta \mathbf{P}^l\}$ – вектор збільшень оптимізуючих параметрів на l -ій ітерації;

$\{\mathbf{P}^{l+1}\}$ – вектор збільшень оптимізуючих параметрів визначається на $l + 1$ -ій ітерації;

β^l – довжина ітераційного кроку.

Вектор збільшень оптимізуючих параметрів визначається при вирішенні системи алгебраїчних рівнянь (СЛАР) виду:

$$[\mathbf{A}]^T [\mathbf{A}] \{\Delta \mathbf{P}\} = [\mathbf{A}]^T \{\mathbf{B}\}, \quad (3.3)$$

де $[A]$ – матриця чутливості, $\{B\}$ – вектор нев'язки.
Зазначені параметри визначаються виразами:

$$[A] = \begin{pmatrix} Z_{1,1}^1 & Z_{1,2}^1 & \dots & Z_{1,n}^1 \\ Z_{2,1}^1 & \dots & Z_{2,n-1}^1 & Z_{2,n}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{m,1}^1 & Z_{m,2}^1 & \dots & Z_{m,n}^1 \end{pmatrix}, \{B\} = \begin{pmatrix} T_{\Theta 1} - T_{P1}^1 \\ T_{\Theta 2} - T_{P2}^1 \\ \dots \\ T_{\Theta m} - T_{Pm}^1 \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

В даному випадку $Z_{j,i}^1$ функція чутливості зміни температури в j -тій просторово-часовій точці вимірювання до зміни i -го параметра P_i вектора P ; $T_{j,\Theta}$ – експериментальне значення температури, виміряне в даній просторово-часовій точці; $T_{j,M}^1$ – значення температури, отримані за допомогою розв'язання прямої задачі теплопровідності (ПЗТ), визначені на попередній ітерації.

Функції чутливості визначаються при «обуренні» одного з параметрів:

$$Z_{i,j} = \frac{\partial T_{jM}(P)}{\partial P_i} = \frac{T_{j,M}(P_1, \dots, P_i + \delta P_i, \dots, P_n) - T_{j,M}(P_1, \dots, P_i, \dots, P_n)}{\delta P_i}, \quad (3.5)$$

де $\delta P_i = 0.001 P_i$ – «обурення», надане параметру [118].

Вектор параметрів $\{P\}$ визначає вид залежностей ТФХ бетону від температури. Як правило це коефіцієнти поліномів. Для бетону відомі різні залежності, як показали наші дослідження, з яких найбільш адекватними є залежності, рекомендовані в [25] (див. табл. 1.11. рядок 3). Дані залежності можна використовувати, як початкове наближення для пошуку оптимальних ТФХ. Таким чином, для формування вектора $\{P\}$ пропонується використовувати п'ять параметрів. Згідно [25] залежність коефіцієнта теплопровідності це парабола з мінімумом при температурі 1200 °С. Тоді залежність коефіцієнта теплопровідності від температури визначиться за допомогою двох параметрів, які показані на рис. 3.17.

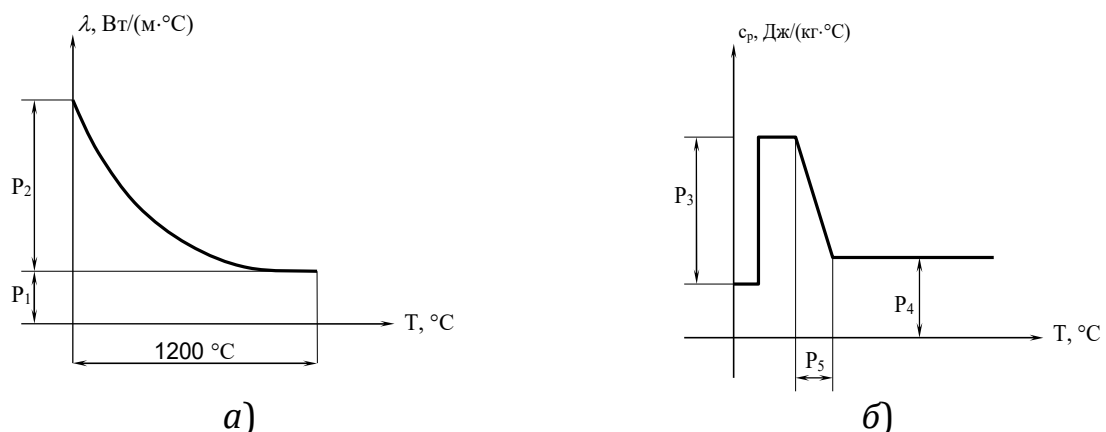


Рис. 3.17 – Параметри, що визначають вид залежностей ТФХ від температури: а – коефіцієнт теплопровідності; б – питома теплоємність

Залежність питомої теплоємності від температури можна визначити трьома параметрами, які показані на рис. 3.17.

Таким чином, залежність коефіцієнта теплопровідності від температури можна описати формулами, що мають вигляд:

$$\lambda(T) = C_0 + C_1 \left(\frac{T}{100} \right) + C_2 \left(\frac{T}{100} \right)^2, \quad C_2 = \frac{P_2 \cdot 10000}{2T_{\max} \Delta T + T_{\min}^2 - T_{\max}^2} \quad (3.6)$$

$$C_1 = -2C_2 \frac{T_{\max}}{100}, \quad C_3 = P_1 + P_2 - C_1 \left(\frac{T}{100} \right) - C_2 \left(\frac{T}{100} \right)^2$$

де $T_{\min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\max} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ – мінімальна і максимальна температури, що обмежують інтервал, у якому визначено залежність коефіцієнта теплопровідності від температури.

Питому теплоємність можна визначити за допомогою таких виразів, куди входять інші три параметра:

900 при $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$,

P_3 при $100 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$P_3 + \frac{P_3 - P_4}{P_5} \cdot T, \quad \text{при } 200 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 200 \text{ }^\circ\text{C} + P_5, \quad (3.7)$$

$$P_4 \text{ при } 200 \text{ }^\circ\text{C} + P_5 < T \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

Для отримання розрахункових значень температур в просторово-тимчасових точках для обчислень вектора неув'язки і матриці чутливості на кожній з ітерацій вирішувалося пряме завдання. У разі визначення температур для циліндричного зразка використовували квазілінійне одномірне рівняння теплопровідності з граничними умовами I роду:

$$c_p(T) \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad T_w = f(t) \quad \text{при } r = r_{\max} \quad (3.8)$$

Для вирішення рівняння (3.8) був застосований МКЕ для задачі нестационарної теплопровідності в комбінації за методом Ньютона-Рафсона [155].

Для нелінійної нестационарної теплової задачі, роздільна система нелінійних рівнянь може бути записана в матричному вигляді [102]:

$$[\bar{K}(T)] \{T\} = \{Q(T)\}, \quad (3.9)$$

де $[\bar{K}(T)]$ – еквівалентна матриця теплопровідності, що залежить від об'ємної теплоємності і коефіцієнта теплопровідності матеріалу;

$\{Q(T)\}$ – вектор вузлових теплових потоків, обумовлених зовнішнім тепловим навантаженням. В узагальненому вигляді вираз (2.1) можна записати:

$$\{P(T)\} = \{Q(T)\}, \quad (3.10)$$

де $\{P(T)\}$ – вектор внутрішніх вузлових теплових потоків, що визначається густиною теплових потоків елемента.

Дана система рівнянь вирішується ітераційним методом Ньютона-Рафсона [102]. При використанні даного методу мінімізується нев'язка:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q(T)\} - \{P(T)\} \rightarrow \{0\}. \quad (3.11)$$

Метод Ньютона-Рафсона заснований на застосуванні усічених рядів Тейлора для залишкового вектора неув'язки. Цим система рівнянь (3.10) лінеаризується і записується у вигляді:

$$[K_T^{(i-1)}]\{\Delta T^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{P^{(i)}\}, \quad (3.12)$$

При цьому виконуються рівноважні ітерації ($i = 1, 2, 3, \dots$), в результаті чого визначаються нові значення температур на кожній ітерації з виразу:

$$\{T^{(i)}\} = \{T^{(i-1)}\} + \{\Delta T^{(i)}\}. \quad (3.13)$$

Процес виконання ітерацій триває до тих пір, поки не досягається прийнятна збіжність.

У рівнянні (3.12) коефіцієнти дотичній матриці $[K_T]$ визначаються з виразів:

$$[K_T^{(i-1)}] \equiv \left(\frac{d\{\Phi\}}{dT} \right)_{i-1}. \quad (3.14)$$

Розкладання вектора $\{\Phi\}$ в усічений ряд Тейлора має вигляд:

$$\{\Phi^{(i)}\} \cong \{\Phi^{(i-1)}\} + [K_T^{(i-1)}]\{\Delta T^{(i)}\}, \quad (3.15)$$

У рівнянні (3.10) $\{Q(T)\}$ – вектор вузлових теплових потоків, що визначається при перевизначенні вектора зовнішнього заданого теплового потоку $\{Q_{on}\}$ і еквівалентної матриці теплопровідності $[K(T)]$. $\{P\}$ – еквівалентний вектор вузлових внутрішніх теплових потоків, що визначається при перевизначенні еквівалентної матриці теплопровідності $[K(T)]$, які визначаються шляхом чисельного інтегрування за часом вектора $\{\Delta T^{(i)}\}$ методом Ейлера з використанням виразу:

$$\{T_{n+1}\} - \{T_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \{\dot{T}_n\} + \Delta t_n \zeta \{\dot{T}_{n+1}\}, \quad (3.16)$$

де Δt_n - крок інтегрування за часом;

ζ - параметр Ейлера, рівний 0,5, що означає реалізацію неявній обчислювальній схемі Кранка-Ніколсона.

Еквівалентна матриця теплопровідності $[\bar{K}(T)]$ визначається з виразу:

$$[\bar{K}_n(T)] = \frac{1}{\zeta \Delta t_n} [C_n(T)] + [K_n(T)], \quad (3.17)$$

де $[C_n(T)]$ и $[K_n(T)]$ - відповідно матриці теплоємності і коефіцієнтів теплопровідності.

Вектор зовнішнього заданого $\{Q_{0n}\}$ теплового потоку визначається з виразу:

$$\{Q_{0n}\} = \{T_{wn}\} A_e \quad (3.18)$$

де A_e - площа грані (довжина сторони) поточного КЕ.

Для вирішення ПЗТ була побудована КЕ-модель циліндричного зразка, показана на рис. 3.18. Сітка КЕ була згущена в області найбільших температурних градієнтів для поліпшення якості рішення і швидкості збіжності ітераційного процесу.

Алгоритм рішення ОЗТ для циліндричного зразка реалізований в програмному середовищі комп'ютерної КЕ-системи ANSYS Multiphysics за допомогою вбудованої параметричної мови програмування APDL. Критерієм зупинки обчислювального процесу було досягнення величиною середньоквадратичного відхилення значення експериментальної помилки вимірювання температур:

$$\frac{1}{n^2} \sum_i (T_{\text{Эi}} - T_{\text{Pi}})^2 \rightarrow \delta^2 \quad (3.19)$$

де $\delta = \pm 1$ °C - штатна експериментальна помилка визначення температури термопар.

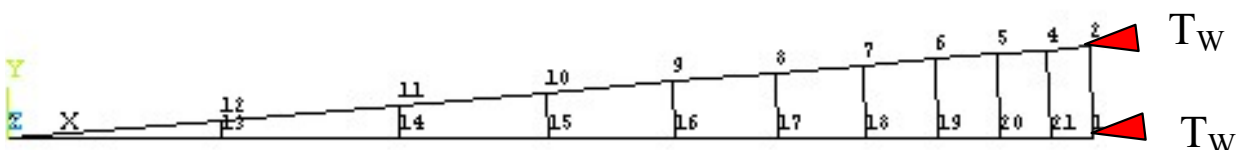


Рис. 3.18 – Кінцево-елементна модель циліндричного зразка для розв'язання прямої задачі теплопровідності

Для вирішення ОЗТ при ідентифікації ТФХ бетону прийняті початкові наближення шуканих параметрів відповідно до рекомендацій [25], приведених в табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Початкові наближення при вирішенні оберненої задачі теплопровідності для ідентифікації теплофізичних характеристик модифікованого бетону

Параметр P ₁ , Вт/(м·°С)	Параметр P ₂ , Вт/(м·°С)	Параметр P ₃ , Дж/(кг·°С)	Параметр P ₄ , Дж/(кг·°С)	Параметр P ₅ , °С
0.3	2.5	2000	1000	100

При розрахунку прийняті середні значення щільності, визначено з експерименту $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$.

Граничні умови експерименту з випробувань кубічних бетонних зразків дозволяють використовувати таке ж математичне забезпечення з тією різницею, що квазілінійне рівняння теплопровідності матиме такий вигляд:

$$c_p(T) \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), T_w = f(t) \text{ при } x = x_{\max}. \quad (3.20)$$

Для вирішення рівняння (3.20) використовується математичний апарат (3.9.) – (3.18.). При цьому була створена КЕ-модель, показана на рис. 3.19.

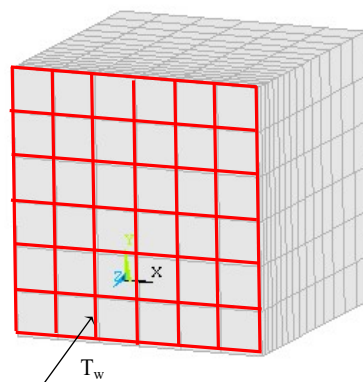


Рис. 3.19 – Кінцево-елементна модель кубічного зразка для розв'язання прямої задачі теплопровідності

3.5.2. Результати ідентифікації теплофізичних характеристик модифікованого бетону

Для ідентифікації ОЗТ зразків модифікованого бетону було проведено аналіз експериментальних даних, які наведені на рис. 3.6.-3.9., 3.13.-3.15. з використанням описаного математичного забезпечення. У табл. 3.3. показані ідентифіковані параметри ТФХ бетону досліджуваних зразків.

**Ідентифіковані параметри теплофізичних характеристик
модифікованого бетону циліндричних зразків**

№ доб.*	Параметр P ₁ Вт/(м·°С)	Параметр P ₂ Вт/(м·°С)	Параметр P ₃ Дж/(кг·°С)	Параметр P ₄ Дж/(кг·°С)	Параметр P ₅ °С	Сер-квадр. відхил, °С
1.	1,63	0,489	2624	1290	85.3	0,788
2.	1.94	0.31	2437.28	1312.8	164.4	0.89
3.	1.56	0.59	2204.5	847.6	277.5	0,72
4.	1.35	0.69	2143.43	932.1	114.2	0,82

* 1 – без добавок; 2 – суперпластифікатор «Coral MasterSILK»;
3 – суперпластифікатор «MasterFIX»;
4 – протиморозна добавка «Sika Antifreeze».

На рис. 3.20. показані ідентифіковані температурні залежності коефіцієнта теплопровідності.

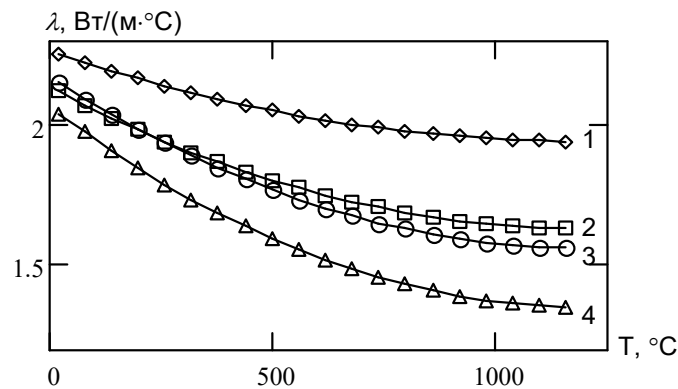


Рис. 3.20 – Ідентифіковані температурні залежності коефіцієнта теплопровідності бетону з добавками циліндричних зразків:
1 – суперпластифікатор «Coral MasterSILK»; 2 – без добавок;
3 – суперпластифікатор «MasterFIX»; 4 – протиморозна добавка «Sika Antifreeze»

На рис. 3.21. показані ідентифіковані температурні залежності питомої об'ємної теплоємності.

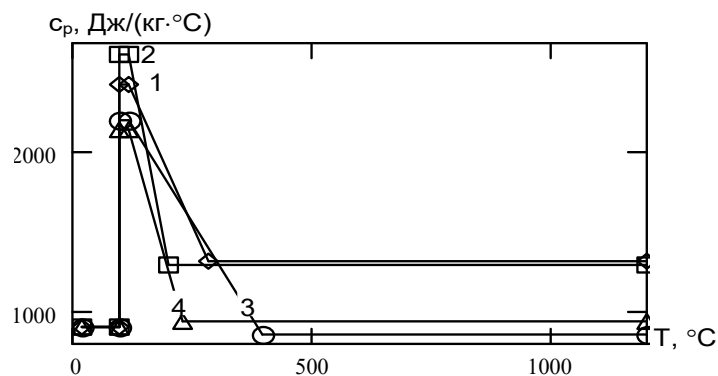


Рис. 3.21 – Ідентифіковані температурні залежності питомої теплоємності:
1 – суперпластифікатор «Coral MasterSILK»; 2 – без добавок; 3 – суперпластифікатор «MasterFIX»; 4 – протиморозна добавка «Sika Antifreeze»

Використовуючи цю ж розрахункову методику були ідентифіковані ТФХ бетону кубічних зразків за результатами їх вогневих випробувань (див. рис. 3.13 – 3.16). У табл. 3.4. наведені ідентифіковані параметри температурних залежностей ТФХ бетону кубічних зразків.

Таблиця 3.4.

Ідентифіковані параметри теплофізичних характеристик модифікованого бетону кубічних зразків

№ доб.*	Параметр P_1 , Вт/(м·°C)	Параметр P_2 , Вт/(м·°C)	Параметр P_3 , Дж/(кг·°C)	Параметр P_4 , Дж/(кг·°C)	Параметр P_5 , °C	Сер-квадр. відхил., °C
1.	0,9	1,5	1934	1145	199.3	5,3
2.	0.77	1.14	2015	910	156	4,7

* 1 – суперпластифікатор «РЕЛАМІКС»;

2 – протиморозна добавка «Кріопласт СП15-1».

На рис. 3.22. показані ідентифіковані температурні залежності коефіцієнта теплопровідності.

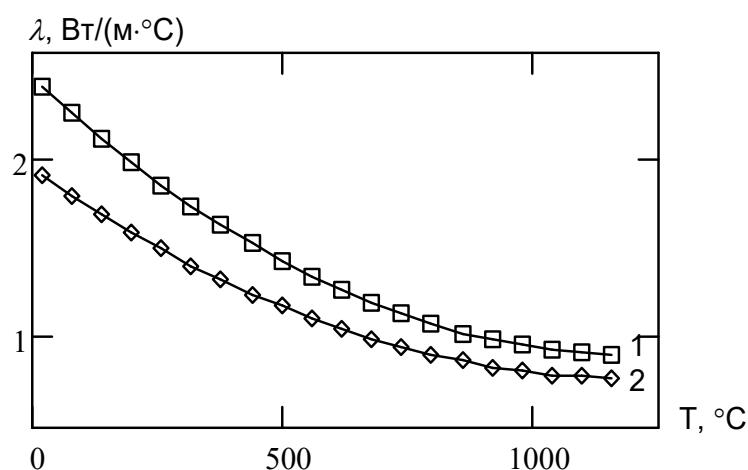


Рис. 3.22 – Ідентифіковані температурні залежності коефіцієнта теплопровідності бетону з добавками кубічних зразків:

1 – суперпластифікатор «РЕЛАМІКС»;

2 – протиморозна добавка «Кріопласт СП15-1»

На рис. 3.23. показані ідентифіковані температурні залежності питомої об'ємної теплоємності.

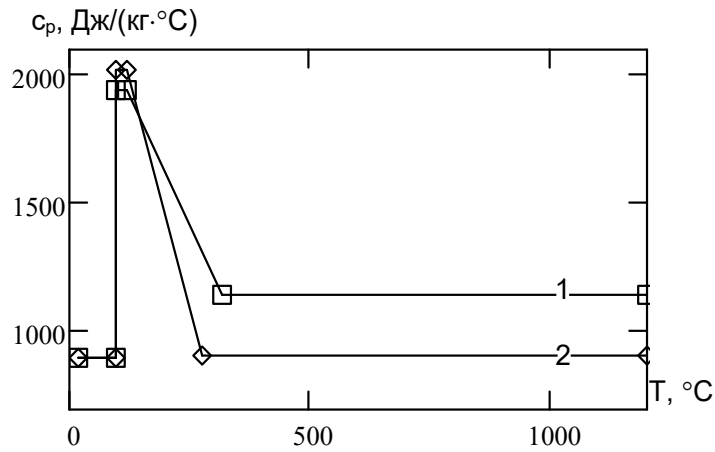


Рис. 3.23 – Ідентифіковані температурні залежності питомої теплоємності кубічних зразків: 1 – суперпластифікатор «РЕЛАМІКС»; 2 – протиморозна добавка «Кріопласт СП15-1»

3.6. Дослідження впливу модифікаторів бетону на швидкість прогрівання залізобетонної балки

Для дослідження впливу модифікаторів бетону на швидкість прогрівання залізобетонних будівельних конструкцій проводився розрахунок температурних полів в їх перетинах при дії пожежі зі стандартним температурним режимом при використанні математичного апарату (1.3), (1.5) – (1.8).

Для розрахунку були обрані типові перетини залізобетонних балок і плит, схеми яких показані на рис. 3.24.

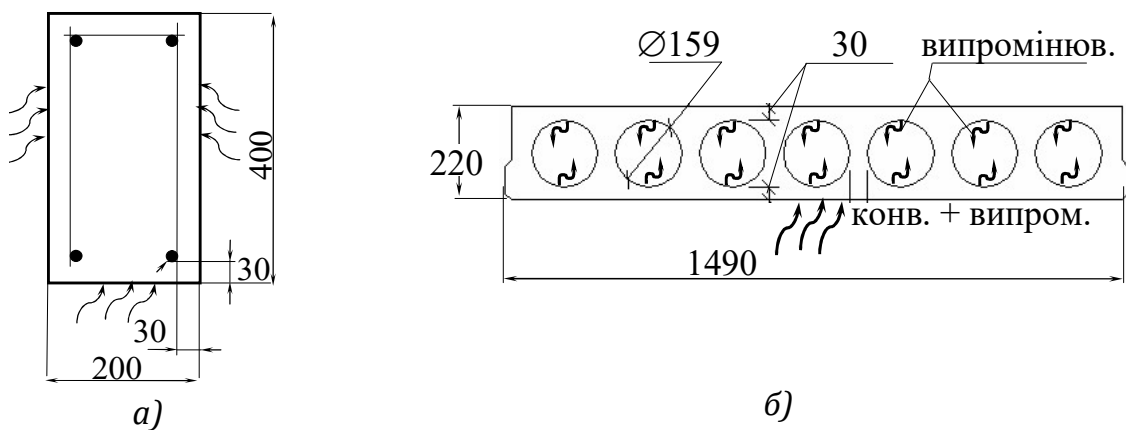


Рис. 3.24 – Розрахункові схеми перетинів залізобетонних конструкцій: а – залізобетонна балка, б – залізобетонна пустотна плита

Для розрахунку застосовувався МКЕ в комбінації з методом Ньютона – Рафсона з використанням математичного забезпечення (3.6) – (3.18). У постановці МСЕ граничні умови III роду записуються за допомогою виразів:

$$\{Q_{0n}\} = \{Q_n^{конв}\} + \{Q_n^{випр}\}, \quad (3.21)$$

де $\{Q_n^{конв}\}$ – поточний вектор конвективного поверхневого вузлового теплового потоку, який визначається за формулою:

$$\{Q_n^{конв}\} = \alpha_k (\{T_{Wn}\} - \{T_{Pn}\}) A_e; \quad (3.22)$$

$\{Q_n^{супр}\}$ – поточний вектор радіаційного поверхневого вузлового теплового потоку, який визначається за формулою:

$$\{Q_n^{конв}\} = \varepsilon \sigma (\{T_{Wn}^4\} - \{T_{Pn}^4\}) A_e; \quad (3.23)$$

$\{T_{Wn}\}$ – вектор поверхневих вузлових температур;
 $\{T_{Pn}\}$ – вектор, члени якого рівні температурі пожежного середовища, яка визначається за формулою (1.1).

При наявності порожнини з взаємним теплообміном поверхонь за допомогою випромінювання вирішується рівняння обміну енергією випромінювання у вигляді:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - F_{ij}) \sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - F_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (3.24)$$

де δ_{ij} – параметр, який дорівнює 0, якщо $i \neq j$, і дорівнює 1, якщо $i = j$;
 q_j – поверхневий тепловий потік через i -ту поверхню, яка обмінюється випромінюванням з j -ю поверхнею.

F_{ij} – променеві формфактори, що залежать від взаємного розташування в i -тій та j -тій площ поверхонь, які обмінюються випромінюванням, які визначаються за формулою:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i. \quad (3.25)$$

У формулі (2.15) використовуються величини:

θ – кут між нормаллю до елемента і лінією, що з'єднує елементи i і j ;

r – відстань між центрами елементів i і j .

Для розрахунку були створені сіткові моделі перетинів, які показані на рис. 3.25.

Після проведення розрахунку були отримані температурні розподіли в перерізі елементів, які дозволили побудувати залежності температури прогріву внутрішніх шарів від часу. На рис. 3.25. і рис. 3.26. показані температури прогріву внутрішніх шарів залізобетонної балки і залізобетонної пустотної плити.

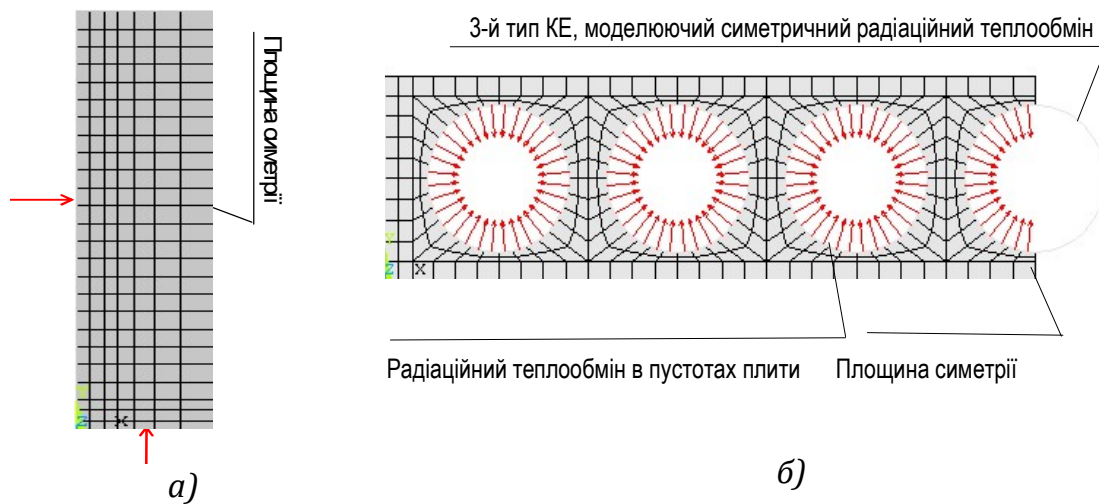


Рис. 3.2 – Кінцево-елементні схеми перетинів несучих залізобетонних конструкцій: а – залізобетонна балка; б – залізобетонна пустотна плита

Аналіз прогріву арматурного шару залізобетонної балки показав, що наявність суперпластифікаторів сильно впливає на швидкість прогрівання. У табл. 3.5 і табл. 3.6 показані результати порівняльного аналізу швидкості прогріву приарматурного шару, які показали що до найбільших швидкостей призводить наявність суперпластифікаторів «MasterFIX», «Coral MasterSILK» і «РЕЛАМІКС». Наявність протиморозних добавок у меншій мірі призводить до збільшення швидкостей.

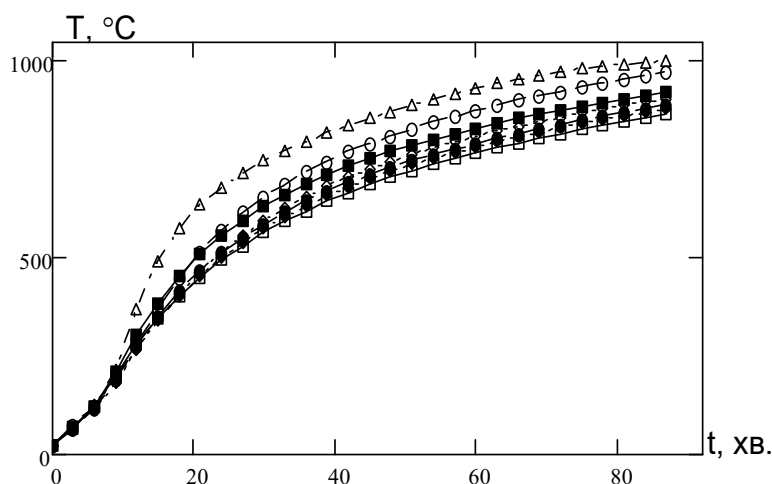


Рис. 3.26 – Температура прогріву приарматурного шару залізобетонної балки із модифікованого бетону:

- ■ ■ - бетон з характеристиками Eurocode 2;
- ◆ ◆ ◆ - бетон без добавок;
- ▲ ▲ ▲ - бетон з суперпластифікатором «MasterFIX»;
- ○ ○ - бетон з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
- ▲ ▲ ▲ - бетон з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»;
- ■ ■ - бетон з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;
- ● ● - бетон з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1»

Таблиця 3.5.

Порівняльний аналіз впливу добавок в бетоні на швидкість прогрівання приарматурного шару залізобетонної балки

Добавка	Середнє відносне відхилення від температури бетону без добавок, %	Відносне відхилення часу досягнення 500°C, %
«MasterFIX»	8,2	13,3
«Coral MasterSILK»	12,9	10,2
«Sika Antifreeze»	3,4	5,5
«РЕЛАМІКС»	7,2	9,5
«КРІОПЛАСТ СП15-1»	2,2	4,1

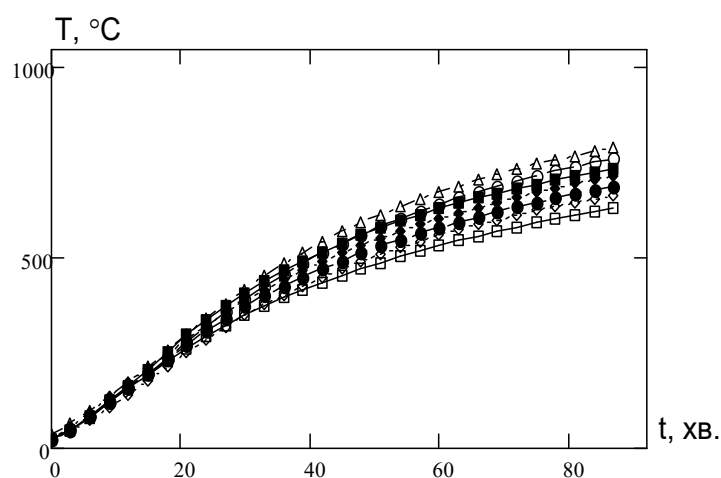


Рис. 3.27 – Температура прогріву приарматурного шару залізобетонної плити із модифікованого бетону:

□□□□ – бетон з характеристиками Eurocode 2;

◇◇◇◇ – бетон без добавок;

▲▲▲ – бетон з суперпластифікатором «MasterFIX»;

○○○ – бетон з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;

▲▲▲ – бетон з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»;

— — — – бетон з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;

●●● – бетон з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1»

Таблиця 3.6.

Порівняльний аналіз впливу добавок в бетон на швидкість прогрівання приарматурного шару залізобетонної плити

Добавка	Середнє відносне відхилення від температури бетону без добавок, %	Відносне відхилення часу досягнення 500 °C, %
«MasterFIX»	5,6	9,1
«Coral MasterSILK»	4,8	8,5
«Sika Antifreeze»	2,4	3,2
«РЕЛАМІКС»	4,4	8,1
«КРІОПЛАСТ СП15-1»	1,2	2,3

На рис. 3.28. і рис. 3.29. наведені розрахункові температурні розподіли в різні моменти часу впливу пожежі для залізобетонної балки, виготовленої з бетону без добавок і модифікованого бетону.

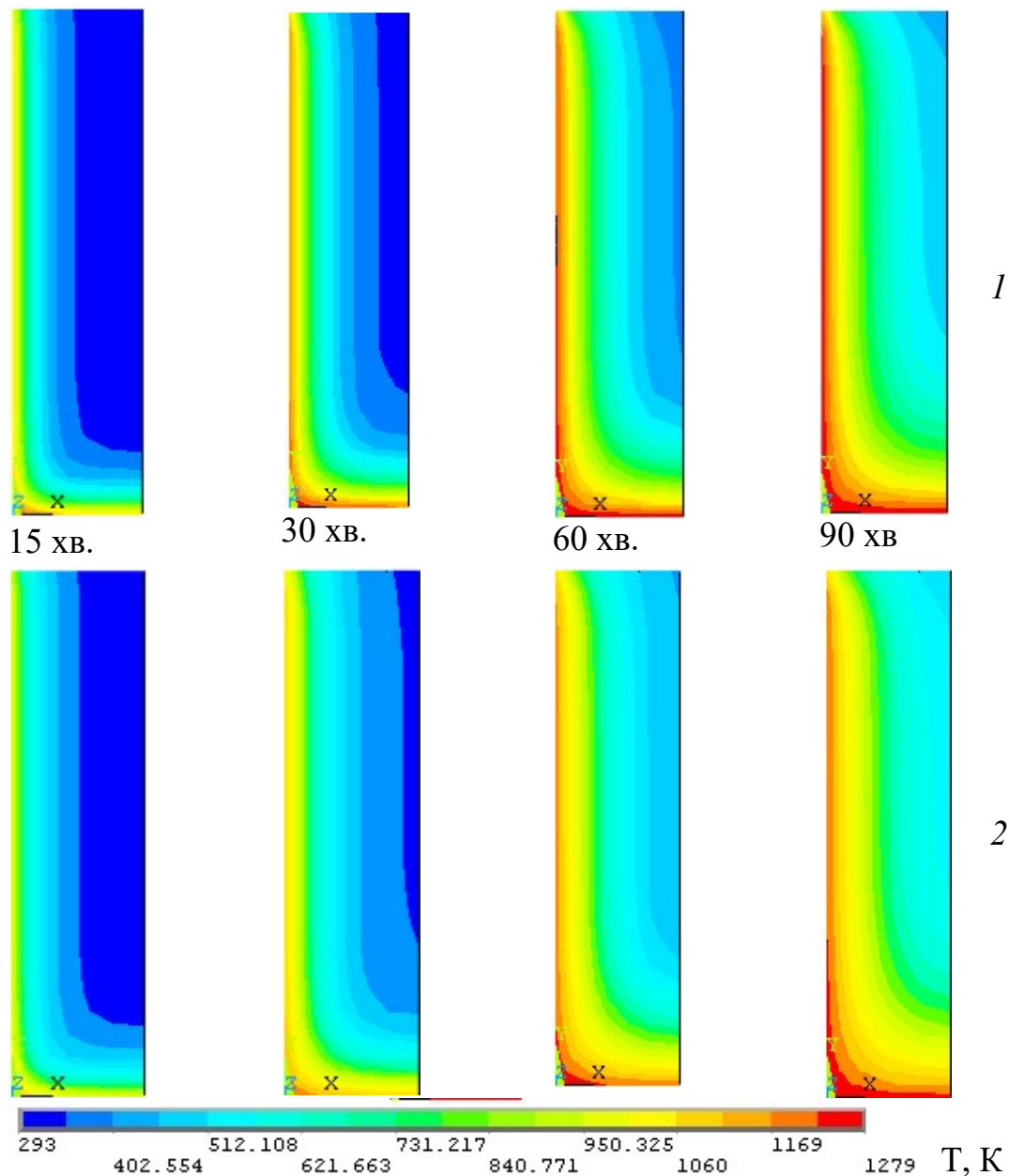


Рис. 3.28 – Температурні розподіли, розраховані для перетину залізобетонної балки із бетону без добавок (1) та із бетону з суперпластифікатором «MasterFIX» (2)

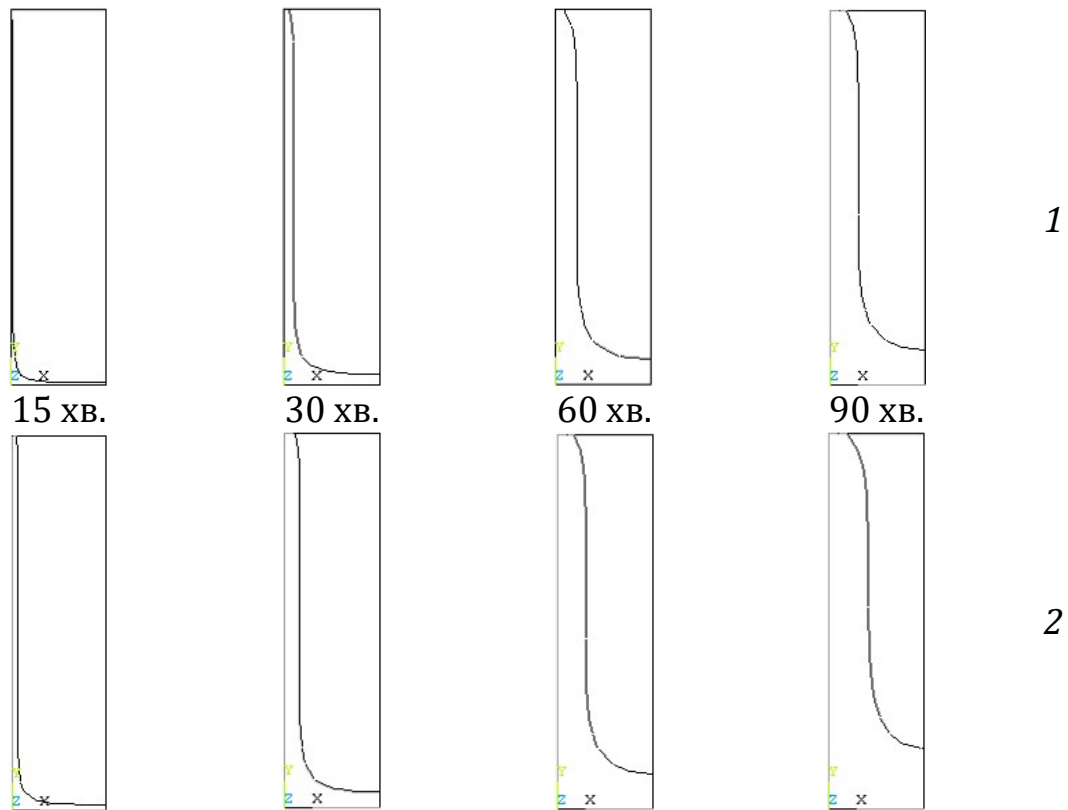


Рис. 3.29 – Положення ізотерми 500 ° С в перерізі залізобетонної балки із бетону без добавок (1) та із бетону з використанням суперпластифікатора «MasterFIX» (2)

Згідно з даними рис. 3.28. і рис. 3.29. ізотерма 500 ° С в перерізі залізобетонної балки з модифікованого бетону з добавкою «MasterFIX» рухається помітно швидше. Це підтверджує, що наявність добавок в бетоні може знижувати межі вогнестійкості за всіма граничними станами. Такі ж дані були отримані і для залізобетонної плити.

Для аналізу впливу добавок на межі вогнестійкості зазначених залізобетонних конструкцій була проведена їх оцінка за допомогою спрощених розрахункових методів на основі міцності бетону марки В30 з пружно-пластичними властивостями бетону і арматурної сталі на основі стандартних діаграм « σ - ϵ », побудованих за моделями Eurocode 2 (табл. 1.12.). Температурно-деформаційні властивості взяті згідно рис. 1.6. і рис. 1.7.

Таблиця 3.7.

Межі вогнестійкості, отримані спрощеними розрахунковими методами для залізобетонної балки

Розрахунковий метод	Нормативний документ	Модифікатор	Межа вогнестійкості, хв.	Віднос. відх. *, %
Ізотермічний метод	Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004 [25]	Без добавок	67	-
		«MasterFIX»	54	19
		«Coral MasterSILK»	57	15
		«Sika Antifreeze»	59	12

Продовження таблиці 3.7.

		«РЕЛАМІКС»	57	15
		«КРІОПЛАСТ СП15-1»	62	7
Зональний метод	Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004 [25]	Без добавок	69	-
		«MasterFIX»	57	17
		«Coral MasterSILK»	61	12
		«Sika Antifreeze»	62	10
		«РЕЛАМІКС»	62	10
		«КРІОПЛАСТ СП15-1»	64	7
Метод на основі деформ. моделі	ДСТУ 36554501-006-2006 [25]	Без добавок	72	-
		«MasterFIX»	61	15
		«Coral MasterSILK»	63	13
		«Sika Antifreeze»	65	10
		«РЕЛАМІКС»	64	12
		«КРІОПЛАСТ СП15-1»	67	7

* Відносно результатів розрахунку для бетону без добавок

З огляду на отримані дані, можна зробити висновок про те, що наявність добавок у складі бетонів надає відчутний вплив на вогнестійкість залізобетонних балок і плит, оскільки відхилення меж вогнестійкості для залізобетонних конструкцій з модифікованого бетону по відношенню до конструкцій з не модифікованого бетону становить в середньому 11 %, а це близько 6 хвилин. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- в результаті проведених досліджень режимів прогріву модифікованого бетону при його теплових випробуваннях встановлено, що наявність модифікаторів підвищує швидкості прогріву бетонних зразків, причому найбільшим ефектом володіють суперпластифікатори.

- розроблено математичний опис оптимізації параметрів теплофізичних характеристик модифікованого бетону для вирішення завдання їх ідентифікації;

- на основі отриманих експериментальних даних були розраховані теплофізичні характеристики для модифікованого бетону випробуваних зразків;

- на основі отриманих теплофізичних характеристик модифікованого бетону були розраховані температурні розподіли в перетинах залізобетонної балки при тепловій дії на них пожежі зі стандартною температурною кривою;

- отримані розрахункові дані дозволили оцінити вплив модифікаторів бетону на прогрів внутрішніх шарів залізобетонної балки і плити і відповідно на час настання втрати їх несучої здатності при пожежі;

- при оцінці впливу модифікаторів бетону на межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій за допомогою спрощених розрахункових методів показано, що в середньому відносне відхилення від меж одержуваних для конструкції з немодифікованим бетоном становить 11% або 6 хвилин для будівель I-го ступеня вогнестійкості.

РОЗДІЛ ІV РЕЗУЛЬТАТИ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ БЕТОННИХ ЗРАЗКІВ

4.1. Механічні випробування кубічних зразків з модифікованого бетону в нагрітому стані

При дослідженні впливу, який можуть мати добавки в бетоні на їх механічні властивості при нагріванні були проведені дослідження кубічних бетонних зразків при їх випробуваннях на стиск в нагрітому стані. Дослідження проводилися відповідно до методики, описаної в п. 2.5.1. на базі випробувальної лабораторії підприємства з виробництва пінобетону ТОВ «Ротіс плюс» м. Кривий Ріг. На рис. 4.1. показаний процес випробування бетонних зразків.



Рис. 4.1 – Процес проведення випробувань кубічних зразків з модифікованого бетону при їх стисненні в нагрітому стані

В результаті проведених випробувань отримані дані про механічні властивості модифікованого бетону. На рис. 4.2. – 4.4. показані діаграми деформування зразків з модифікованого бетону для випробувань при різних температурах нагріву.

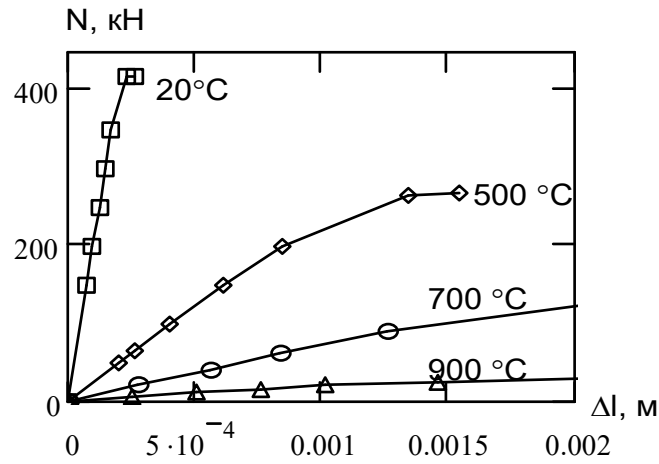


Рис. 4.2 – Діаграми деформування зразків бетону без добавок

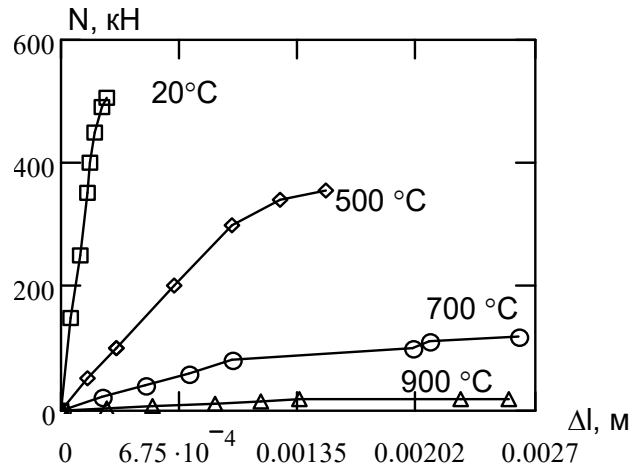


Рис. 4.3 – Діаграми деформування зразків бетону з суперпластифікатором «РЕЛАМИКС»

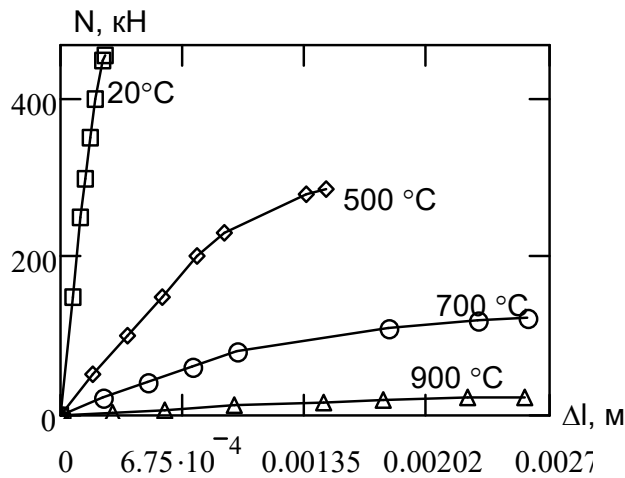


Рис. 4.4 – Діаграми деформування зразків бетону з протиморозною добавкою «Кріопласт СП15-1»

При оцінці можливого впливу добавок на механічні властивості було проведено порівняльний аналіз на побудованих діаграмах в координатах «напруги – відносні деформації». На рис. 4.5. – 4.7. показані діаграми деформування для певних температурних режимів нагріву зразків.

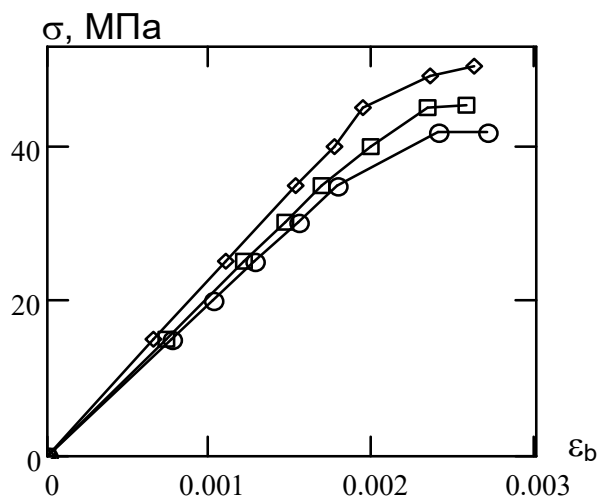


Рис. 4.5 – Діаграми деформацій при нормальних умовах для бетону:
 ○○○ – без добавок; ◇◇◇ – з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;
 □□□ – з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1».

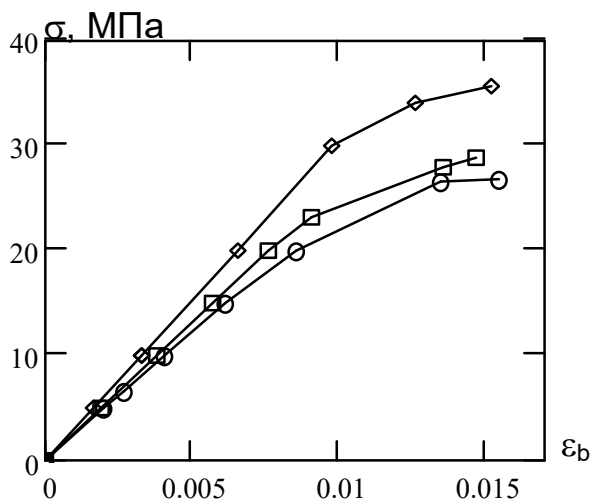


Рис. 4.6 – Діаграми деформацій при прогріву бетону до 500 °С:
 ○○○ – без добавок; ◇◇◇ – з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;
 □□□ – з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1».

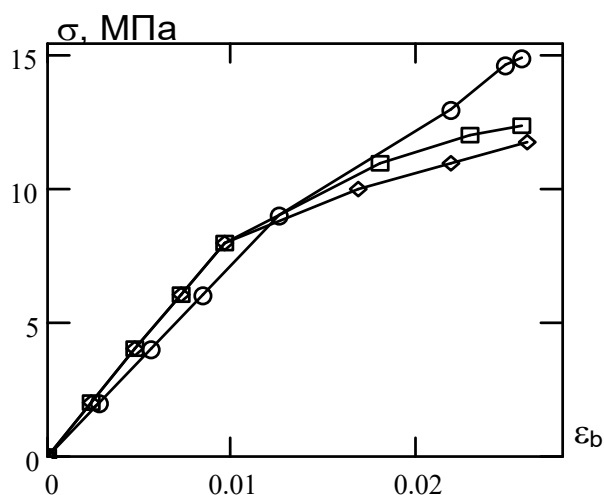


Рис. 4.7 – Діаграми деформацій при прогріву бетону до 700 °С:
 ○○○ – без добавок; ◇◇◇ – з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;
 □□□ – з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1»

Аналіз рис. 4.5. – 4.8. показав, що при температурах до 500 °С міцність зразків з добавками вище ніж бетону без добавок, але при температурах вище цієї межі картина змінюється і міцність зразків з добавками знижується значно швидше.

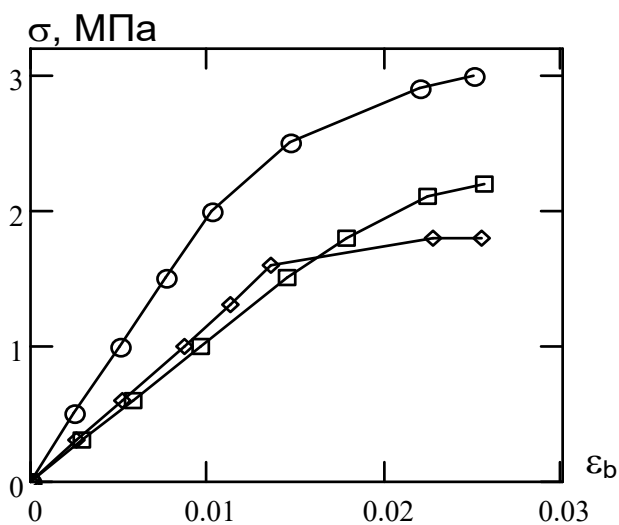


Рис. 4.8 – Діаграми деформацій при прогріву бетону до 900 °С:
 ○○○ – без добавок; ◇◇◇ – з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;
 □□□ – з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1»

На рис. 4.9. наведено графік залежності коефіцієнта роботи бетону, який описує динаміку зниження міцності бетону при нагріванні.

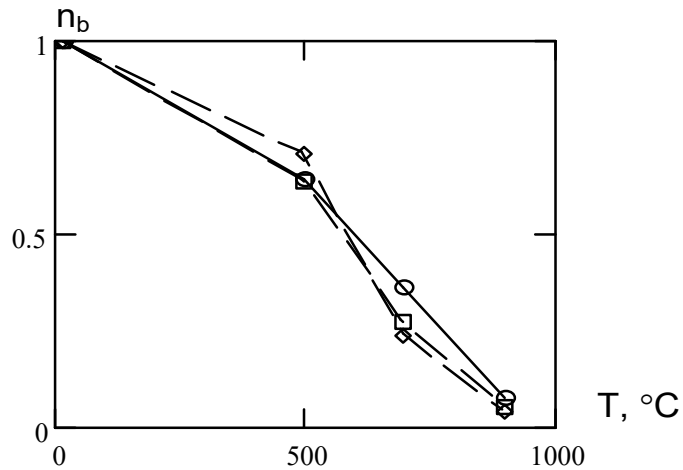


Рис. 4.9 – Залежності коефіцієнта зниження міцності бетону від температури нагріву:

○-○- без добавок; ◇-◇- з суперпластифікатором «РЕЛАМИКС»;
 ■-■- з протиморозною добавкою «КРИОПЛАСТ СП15-1»

Також досліджувалися деформативні характеристики. На рис. 4.10. показаний характер зміни модуля пружності бетону в залежності від температури нагріву.

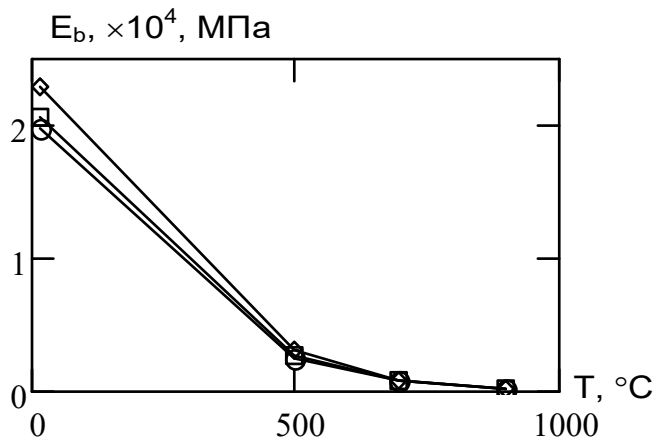


Рис. 4.10 – Залежність початкового модуля пружності бетону від температури нагріву:

○-○- без добавок; ◇-◇- з суперпластифікатором «РЕЛАМИКС»;
 ■-■- з протиморозною добавкою «КРИОПЛАСТ СП15-1»

На рис. 4.11. показана залежність коефіцієнта зниження початкового модуля пружності бетону.

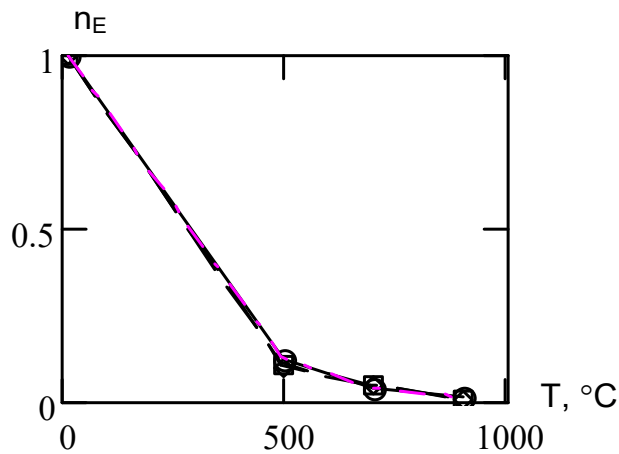


Рис. 4.11 – Залежності коефіцієнта зниження початкового модуля пружності бетону від температури нагріву:

○-○- без добавок; ◆-◆- з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;
 □-□- з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1»

Аналіз рис. 4.10. і рис. 4.11. показує, що наявність добавок майже не впливає на коефіцієнт зниження модуля пружності бетону.

Для вивчення можливих причин впливу модифікаторів на міцність бетону при нагріванні була виміряна щільність зразків до і після проведення випробувань. На рис. 4.12. показаний графік зміни щільності зразків в залежності від температури їх нагріву.

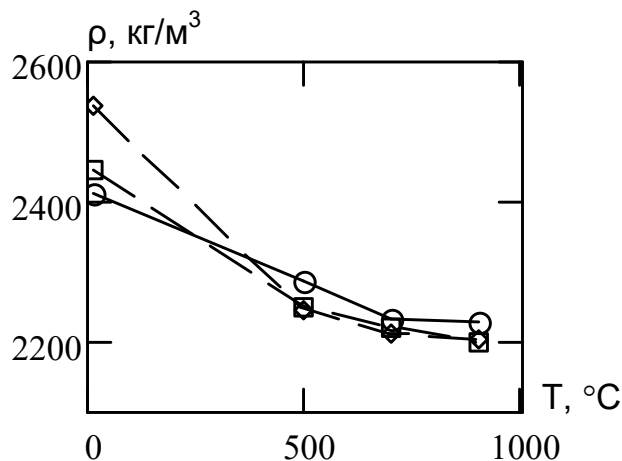


Рис. 4.12 – Залежності зниження щільності бетону від температури нагріву:

○-○- без добавок; ◆-◆- з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;
 □-□- з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1»

На рис. 4.13 показані залежності зниження відносної щільності бетону від температури. Дані рис. 4.12. і рис. 4.13. свідчать про те, що зниження міцності має кореляцію з різким зниженням щільності зразків з модифікованого бетону в області 400 – 500 ° C, що пов'язано з процесами вигорання пористого каркаса цементного каменю, що

приводять до подальшої швидкої втрати міцності бетону в області більш високих температур.

Проведені дослідження показали, що наявність модифікаторів в бетоні обумовлює його специфічну поведінку в умовах нагріву. Міцність бетону з модифікаторами починає знижуватися швидше в порівнянні з бетоном без добавок і значення бетону з добавками, який був міцніше ніж бетон без добавок в умовах нагрівання до температур менше ніж 500 ° С, то в області більш високих температур його міцність відчутно менше, ніж міцність бетону без добавок.

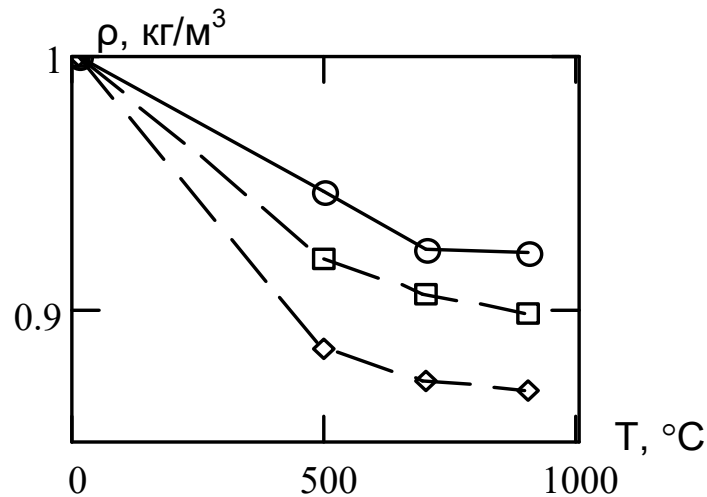


Рис. 4.1 – Залежність зниження щільності бетону від температури нагріву:
○-○- без добавок; ◆-◆- з суперпластифікатором «РЕЛАМІКС»;
■-■- з протиморозною добавкою «КРІОПЛАСТ СП15-1»

Описані явища обумовлені хімічними процесами деструкції цементного каменю з модифікованим складом. Дані результати показують, що модифікований бетон може знизити межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій, з якого вони виготовлені.

4.2. Механічні випробування циліндричних зразків з модифікованого бетону в нагрітому стані

При дослідженні впливу, який можуть мати добавки в бетоні на їх механічні властивості при нагріванні, були проведені дослідження циліндричних бетонних зразків при їх випробуваннях на стиск з одночасним їх нагріванням.

При формуванні граничних умов для моделювання поведінки внутрішніх шарів має значення збіг температур прогріву зразків і рівномірність її розподілу при проведенні випробувань на стиск.

При визначенні параметрів нагріву зразка необхідно вирішити ОЗТ по відновленню граничних умов. Параметрами, визначеними при вирішенні даного завдання є максимальна температура нагріву і час

витримки при даній температурі для виконання поставлених умов рівномірності і рівня температур прогріву зразка. Вихідними даними тут є температура зразка, яка визначається як середнє значення при стаціонарному режимі і коефіцієнти переносу. Коефіцієнти переносу – це коефіцієнти теплопровідності, питома об'ємна теплоємність, які визначені в п. 3.5.2., а також коефіцієнт теплообміну, температурна залежність (див. рис. 4.14.), якого визначена в [59].

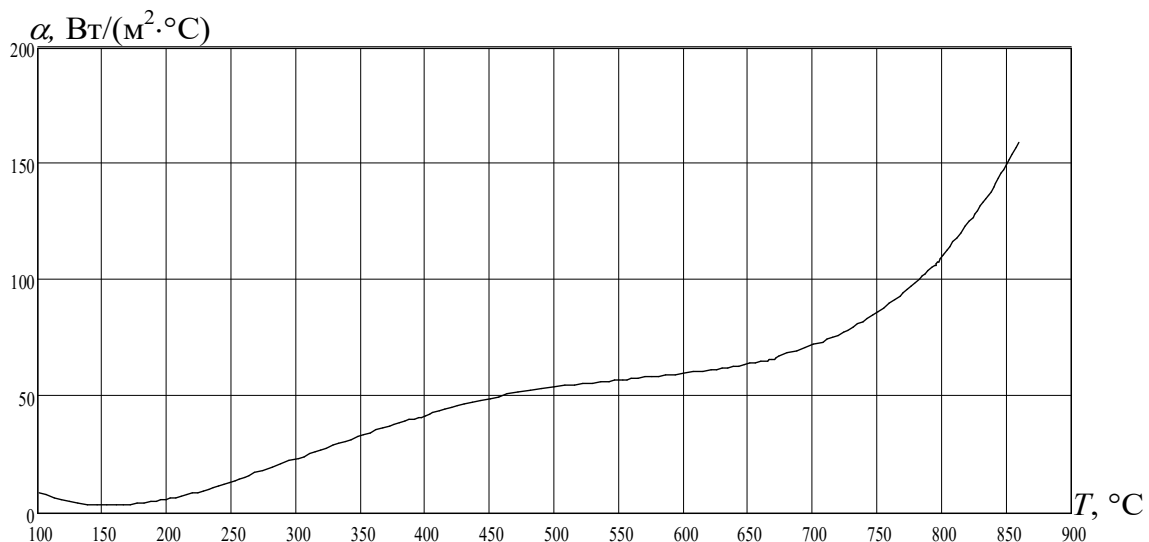


Рис. 4.14 – Узагальнена залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури середовища

Розрахунок проводився в такій послідовності:

1. Шляхом рішення ПЗТ при використанні стаціонарного рівняння теплопровідності (4.1) з ГУ першого роду, що мають вигляд [36]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad T_w = f(t) \quad \text{при } r = r_{\max}, \quad (4.1)$$

визначався середній розкид значень температур по перетину зразка, після чого встановлювалося значення температури перетину зразка для реалізації даного режиму нагріву.

2. Методом автоматизованого підбору визначалася температура поверхні циліндричного зразка.

3. Використовуючи залежність коефіцієнта теплообміну, визначався температура камери печі.

4. На основі розв'язання прямої задачі нестационарної теплопровідності при використанні математичного апарату (3.8)-(3.17) визначалося час витримки зразка при заданій температурі.

У табл. 4.1. наведені параметри режимів нагріву зразків.

**Параметри режимів нагріву при випробуваннях
циліндричних зразків**

Зразок із бетону з добавкою:	Параметри режимів нагріву					
	Середня температура нагріву зразка 300 °С		Середня температура нагріву зразка 500 °С		Середня температура нагріву зразка 700 °С	
	Максимальна температура в печі, °С	Час витримки, хв.	Максимальна температура в печі, °С	Час витримки, хв.	Максимальна температура в печі, °С	Час витримки, хв.
без добавок	430	20	715	35	910	47
«Coral MasterSILK»	395	23	689	32	890	45
«MasterFIX»	369	23	677	31	885	40
«Sika Antifreeze»	405	23	691	33	895	47

Розкид температур по перетину зразка склав в середньому 34 °С, що є прийнятним для даних випробувань [59].

Використовуючи методику, описану в п. 2.5.2. були проведені випробування циліндричних зразків на установці, показаній на рис. 2.13.

На рис. 4.15. – 4.19. наведені результати випробувань.

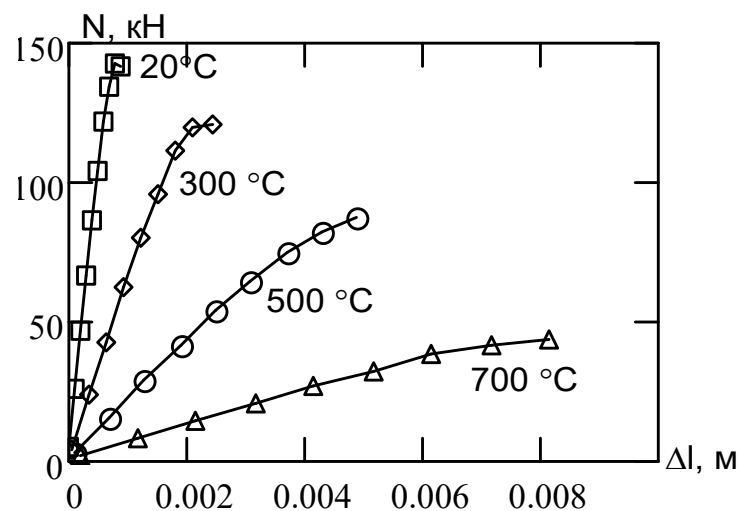


Рис. 4.15 – Діаграми деформування зразків з бетону без добавок

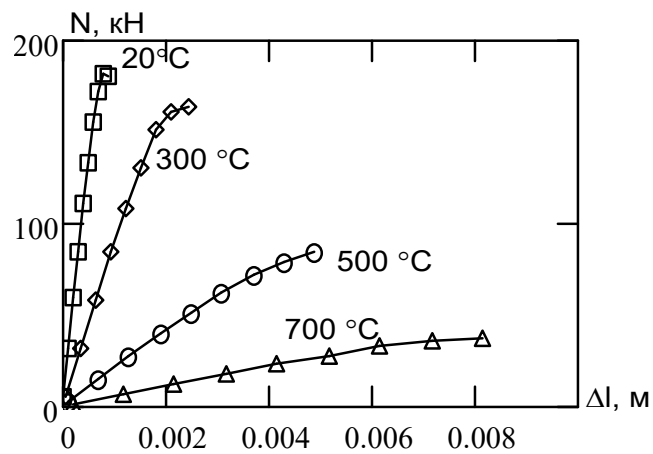


Рис. 4.16 – Діаграми деформування зразків бетону з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»

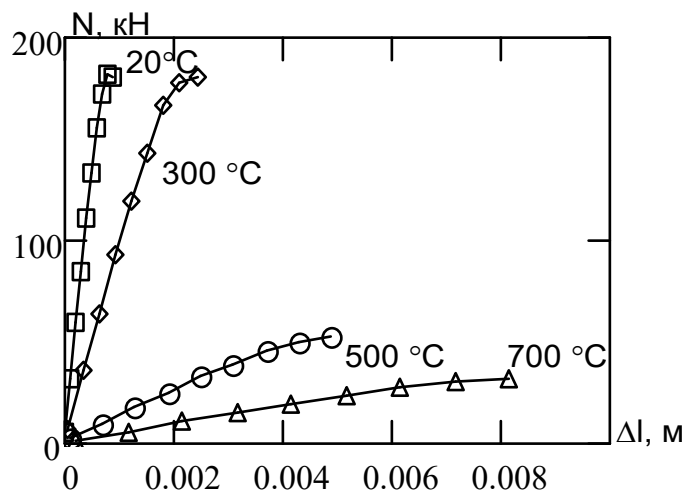


Рис. 4.17 – Діаграми деформування зразків бетону з суперпластифікатором «MasterFIX»

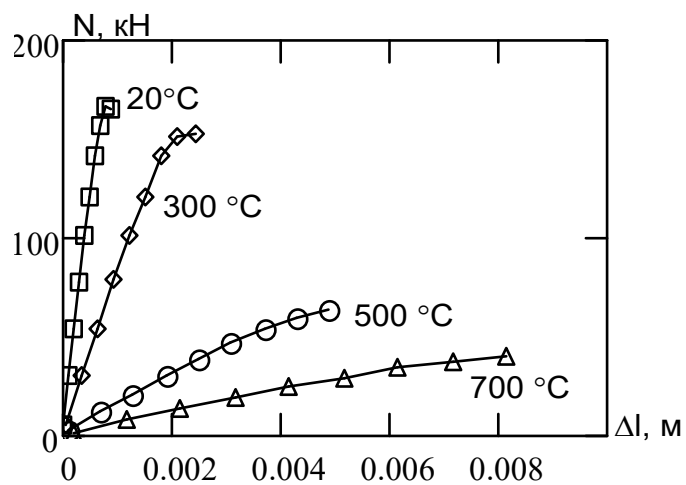


Рис. 4.18 – Діаграми деформування зразків бетону з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

При оцінці можливого впливу добавок на механічні властивості було проведено порівняльний аналіз на побудованих діаграмах в координатах «напруги – відносні деформації». На рис. 4.19. – 4.22. показані діаграми деформування для певних температур режимів нагріву зразків.

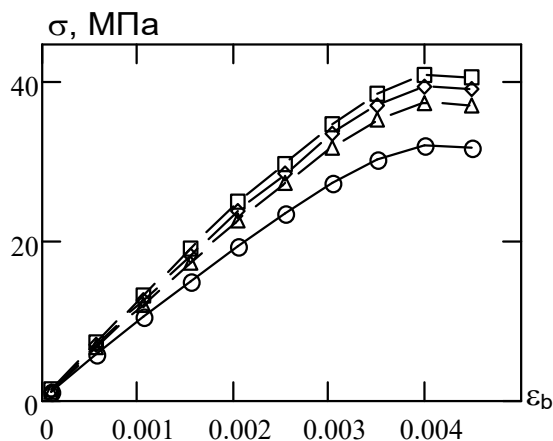


Рис. 4.19 – Діаграми деформування при нормальних умовах для бетону:
 ○○○ – без добавок; ◇◇◇ – з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
 □□□ – з суперпластифікатором «MasterFIX»;
 ▲▲▲ – з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

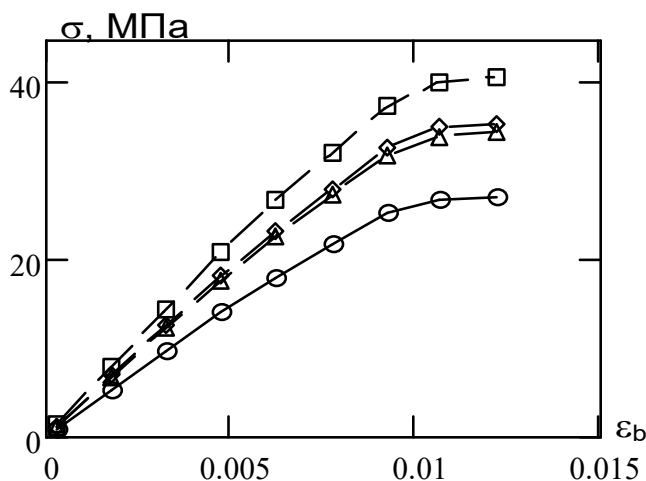


Рис. 4.20 – Діаграми деформування при температурі 300 °С для бетону:
 ○○○ – без добавок; ◇◇◇ – з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
 □□□ – з суперпластифікатором «MasterFIX»;
 ▲▲▲ – з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

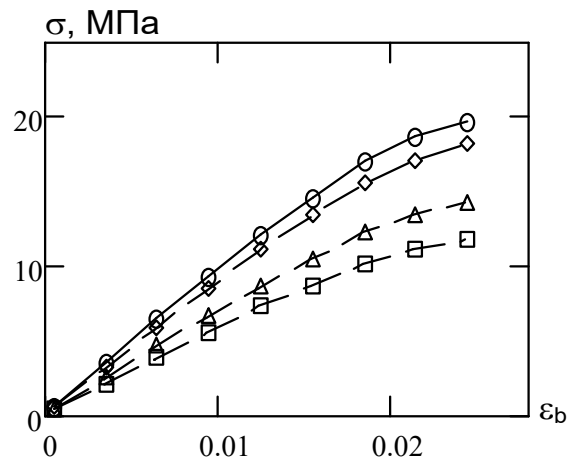


Рис. 4.21 – Діаграми деформування при температурі 500 °С для бетону:
 ○○○ – без добавок; ◇◇◇ – з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
 □□□ – з суперпластифікатором «MasterFIX»;
 ▲▲▲ – з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

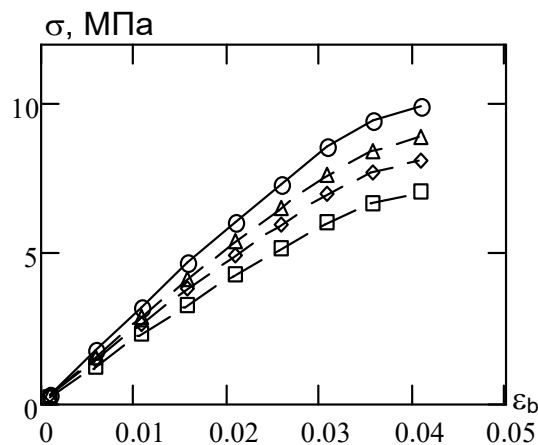


Рис. 4.22 – Діаграми деформування при температурі 700 °С для бетону:
 ○○○ – без добавок; ◇◇◇ – з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
 □□□ – з суперпластифікатором «MasterFIX»;
 ▲▲▲ – з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

Аналіз рис. 4.19 – 4.22 показав, що при даних випробуваннях спостерігається ефект подібний до того, який спостерігався при випробуваннях зразків-кубів. При температурах від 500 °С і вище міцність зразків з добавками відчутно нижче ніж бетону без добавок. При цьому даний ефект настає швидше, що пов'язано з більш рівномірним прогріванням зразків, а значить майже одночасно з деградацією міцності властивостей бетону.

На рис. 4.23 наведено графік залежності коефіцієнта роботи бетону, який описує динаміку зниження міцності бетону при нагріванні відповідно даним випробуванням.

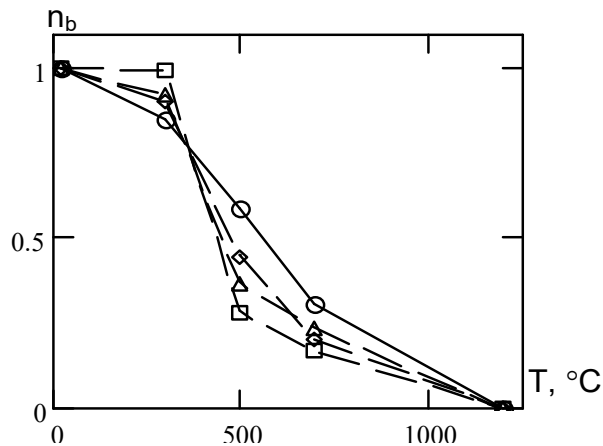


Рис. 4.23 – Залежності коефіцієнта зниження міцності бетону від температури нагріву: o-o-o – без добавок;
 ◇-◇-◇ – з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
 ▣-▣-▣ – з суперпластифікатором «MasterFIX»;
 △-△-△ – з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

Графіки на рис. 4.23. показують істотну зміну міцності модифікованого бетону в порівнянні з бетоном без добавок при температурах від 500 °С і вище.

Таким чином, дослідження кубічних і циліндричних зразків з модифікованого бетону підтверджують наявність характерного зниження міцності, описаного вище. Даний ефект не може не вплинути на величину межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності залізобетонних будівельних конструкцій.

Також досліджувалися деформовані характеристики. На рис. 4.24. показаний характер зміни модуля пружності бетону в залежності від температури нагріву.

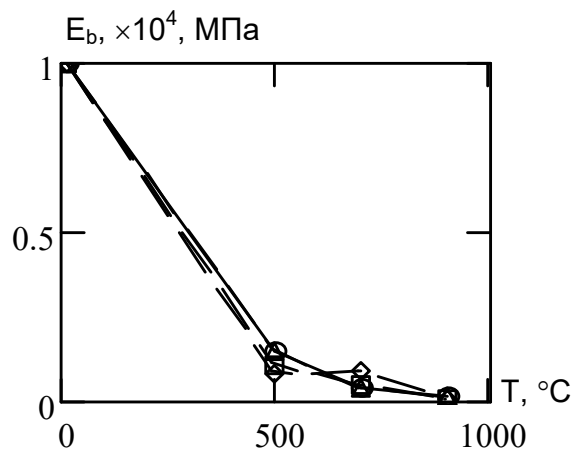


Рис. 4.24 – Залежність початкового модуля пружності бетону від температури нагріву: o-o-o – без добавок;
 ◇-◇-◇ – з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
 ▣-▣-▣ – з суперпластифікатором «MasterFIX»;
 △-△-△ – з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

Дослідження зміни модуля пружності в залежності від температури показали, що характер його зміни для модифікованого і немодифікованого бетону істотних відмінностей не має.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

- вдосконалена експериментальна і розрахункова база для випробувань циліндричних зразків при одночасному нагріванні і механічному стисканні;

- за допомогою вдосконаленої розрахункової і випробувальної бази проведені дослідження міцності і пружно-пластичних властивостей модифікованого бетону;

- показано, що при температурах від 500 ° С і вище відбувається суттєва зміна міцності модифікованого бетону в порівнянні з бетоном без добавок більшою мірою для суперпластифікаторів і в меншій мірі для протиморозних добавок;

- показано, що наявність модифікаторів суттєво не впливає на зміну модуля пружності модифікованого бетону при різних температурах по відношенню до немодифікованого бетону;

- дослідження щільності зразків з модифікованого і немодифікованого бетону до і після нагрівання показали, що в області 400 – 500 ° С зменшення щільності, в результаті нагрівання для модифікованих зразків, відбувається значно швидше;

- зміна щільності корелює зі зміною міцності властивостей, що показує як деградація міцності властивостей модифікованого бетону обумовлена хімічними процесами деструкції цементного каменю з модифікованим складом;

- в результаті проведених досліджень міцності і пружно-пластичних властивостей бетону показано, що наявність модифікаторів в його складі істотно змінюють ці властивості, що в свою чергу впливає на межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій.

РОЗДІЛ V
УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАТОРІВ БЕТОНУ ПРИ
РОЗРАХУНКОВОМУ ВИЗНАЧЕННІ МЕЖ ВОГНЕСТІЙКОСТІ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

5.1. Математичне забезпечення для визначення межі вогнестійкості залізобетонних балок за результатами випробувань бетону

Для визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій використовується узагальнений інженерний підхід, який базується на наступних положеннях [71, 72, 95].

1. Для розрахунку розглядається об'ємний напружено-деформований стан твердого тіла.

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

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

4. В якості роздільної системи рівнянь використовується базовий математичний апарат МКЕ в комбінації з методом Ньютона – Рафсона шляхом покрокового додатку діючого механічного навантаження на початковому етапі і покрокового додатку температурних навантажень на заключному етапі з інтервалом 1 хв. відповідно до [2].

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

6. Робота пошкодженого елемента і умови його пошкодження визначаються відповідною теорією міцності бетону і введенням певних напрямків тріщин ортотропії властивостей в матеріальній матриці.

7. Пластичні деформації враховуються на ділянці діаграми, відповідній появі пластичної течії, при цьому деформації залишаються пружними при практично нульовому модулі пружності. Таке припущення можливо зробити, оскільки відсутнє розвантаження шарів матеріалу, у якому з'явилися пластичні деформації, а значить зміцнення матеріалу можна не враховувати.

8. Критерієм глобального руйнування елемента залізобетонної будівельної конструкції є втрата стійкості елемента при появі пластичних деформацій в арматурі, якими супроводжується утворення пластичного шарніра.

Серед чисельних методів найбільш ефективним для даного класу задач є МКЕ [37, 95, 102]. Із застосуванням даного методу розроблено та реалізовано надійні математичні моделі ортотропної роботи композиційного матеріалу, яким є залізобетон, а також ефективні і економічні обчислювальні алгоритми [95, 102]. З огляду на це,

вирішальне узагальнене рівняння рівноваги КЕ в локальній системі координат в постановці методу переміщень [95, 102] має вигляд:

$$[\mathbf{K}_e] \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}_e\}^{\text{nd}} + \{\mathbf{F}_e\}^{\text{pr}} + \{\mathbf{F}_e\}^{\text{th}}, \quad (5.1)$$

де $[\mathbf{K}_e]$ – матриця жорсткості КЕ, яка визначається за формулою:

$$[\mathbf{K}_e] = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV; \quad (5.2)$$

$\{\mathbf{F}_e\}^{\text{nd}}$ – вектор зосереджених вузлових КЕ;

$\{\mathbf{F}_e\}^{\text{pr}}$ – вектор розподіленого навантаження, прикладеного до КЕ, який визначається за формулою:

$$\{\mathbf{F}_e\}^{\text{pr}} = \int_S [\mathbf{N}_n]^T \{\mathbf{P}\} dS; \quad (5.3)$$

$\{\mathbf{F}_e\}^{\text{th}}$ – вектор температурних навантажень, прикладених до КЕ, який визначається за формулою:

$$\{\mathbf{F}_e\}^{\text{th}} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \{\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{th}}\} dV; \quad (5.4)$$

$\{\mathbf{u}\}$ – вектор вузлових переміщень КЕ;

$\{\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{th}}\}$ – вектор вузлових температурних деформацій КЕ.

У формулах (3.2) – (3.4) матриця деформацій в КЕ визначається як $\mathbf{B} = \mathbf{D} [\mathbf{N}]$, де $[\mathbf{N}]$ і $[\mathbf{N}_n]$ відповідно матриці об'ємних інтерполяційних функцій і інтерполяційних функцій по межі КЕ, куди включені розподілені навантаження, а \mathbf{D} – диференціальний оператор. При відомих параметрах, що входять в матриці рівняння (3.1), можна його вирішити щодо вузлових переміщень $\{\mathbf{u}\}$. Потім, використовуючи матрицю інтерполяційних функцій, визначити переміщення всередині КЕ. Для визначення напружень в КЕ застосовується рівняння:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} (\{\boldsymbol{\varepsilon}\} + \{\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{th}}\}) + \boldsymbol{\sigma}_0, \quad (5.5)$$

де \mathbf{E} – матриця коефіцієнтів пружності.

Для опису ПДВ елементів залізобетонної конструкції, розбитого на КЕ використовується рівняння [95, 102]:

$$[\mathbf{K}] \{\mathbf{q}\} = \{\bar{\mathbf{P}}\}, \quad (5.6)$$

де $[\mathbf{K}]$ – матриця жорсткості всієї системи, що складається з матриць жорсткостей всіх КЕ;

$\{\mathbf{q}\}$ – вектор шуканих переміщень вузлових точок, що складається з сум векторів переміщень вузлових точок КЕ;

$\{\bar{\mathbf{p}}\}$ – вектор сил для вузлів, що складається з сум всіх сил, які діють на вузли КЕ.

Для вирішення рівнянь МСЕ (4.1) – (4.6) з урахуванням фізичних та геометричних нелінійностей застосовується ітераційна процедура методу Ньютона-Рафсона. Для реалізації ітераційного процесу при даних видах нелінійностей основні дозвільні рівняння МСЕ записуються в інкрементальній постановці.

$$[K(\{q_n\})] \{\Delta q\} - \{\bar{p}(\{q_n\})\} = 0; \quad (5.7)$$

Це означає, що діюче навантаження прикладається не відразу, а на кілька кроків. В цьому випадку дуже зручним є параметр часу, який фіксує поточний стан прикладених навантажень і деформацій, які ними викликані. Ітераційний процес відбувається з використанням такого виразу:

$$\{q_{n+1}\} = \{q_n\} + [K(\{q_n\})]^{-1} \{\Delta \bar{p}\}. \quad (5.8)$$

Таким чином, процес обчислення триває поки не буде досягнута прийнятна точність шуканого рішення.

Як критерій руйнування КЕ і введення ортотропії в матрицю Е використовується складовою критерій Willam і Warnke [102].

Критерій руйнування бетону при складному напруженому стані може бути виражений наступним чином:

$$F/R_b - B \geq 0, \quad (5.9)$$

де F – функція стану головних напружень ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$);

Якщо умова (4.9) не виконується, то утворення тріщин не відбувається. При цьому всі напружені стани обмежуються певною поверхнею B , яка визначається головними напруженнями і п'ятьма характеристиками міцності параметрами $R_b, R_{bt}, R_{cb}, R_{cbt}$ и $R_{bt\sigma}$.

Відповідно до теорії міцності Willam і Warnke [102] поверхня руйнування може бути задана з використанням меж міцності на стиск і на розтяг R_b, R_{bt} , інші параметри можна визначити за формулами:

$$R_{cbt} = 1,2R_b, R_{bt\sigma} = 1,45R_b, R_{cb} = 1.725R_b \quad (5.10)$$

Критерій міцності (4.9) є складовим і поверхня руйнування будується на основі розгляду чотирьох можливих варіантів руйнування.

5.1.1. Математичний опис діаграм деформування бетону

Для опису пружних і міцнісних властивостей використовуються діаграми деформування з ділянкою, що описує пластичність. У табл. 1.12. представлені математичні вирази, які дозволяють будувати такі діаграми, спираючись на базові параметри, якими є межа міцності на стиск R_b і граничні деформації. В якості базової моделі пружних

властивостей бетону була обрана модель, запропонована в чинному стандарті Росії [24] (табл. 1.12., рядок 1). При розгляді даної математичної моделі можна відзначити, що діаграми можна будувати на пружній ділянці, використовуючи початкову міцність R_b при нормальних умовах, коефіцієнт зниження міцності n_b і коефіцієнт зниження модуля пружності n_E , що визначаються експериментально (рис. 4.23.-4.24.). На пластичній ділянці використовують граничні пластичні деформації, що рекомендуються в [25].

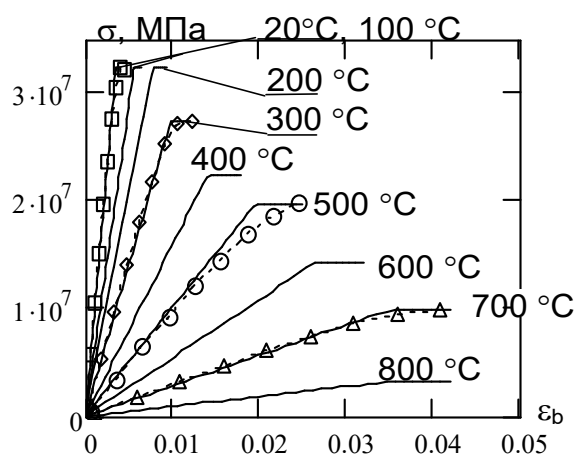


Рис. 5.1 – Діаграми деформування для бетону без добавок

Таким чином, використовуючи експериментальний матеріал, можна побудувати діаграми, які дозволять розрахувати межу вогнестійкості залізобетонної балки. Дані діаграми були побудовані для бетону без добавок і для модифікованого бетону на основі отриманого експериментального матеріалу, описаного в п. 4.2. На рис. 5.1.-5.4. показані побудовані двохлінійні діаграми.

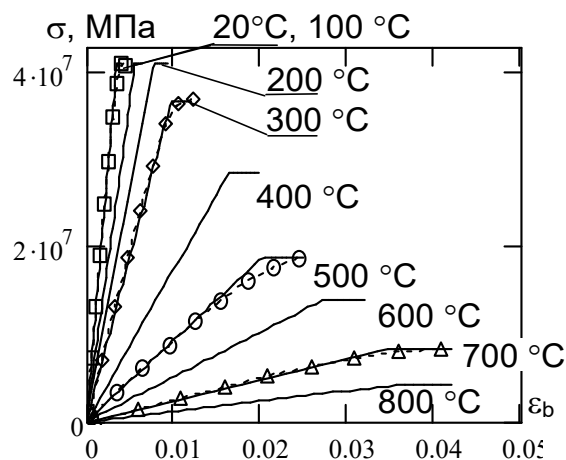


Рис. 5.2 – Діаграми деформування для бетону з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»

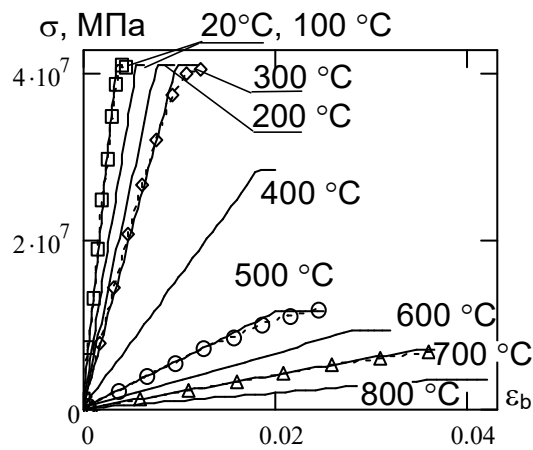


Рис. 5.3 – Діаграми деформування для бетону з суперпластифікатором «MasterFIX»

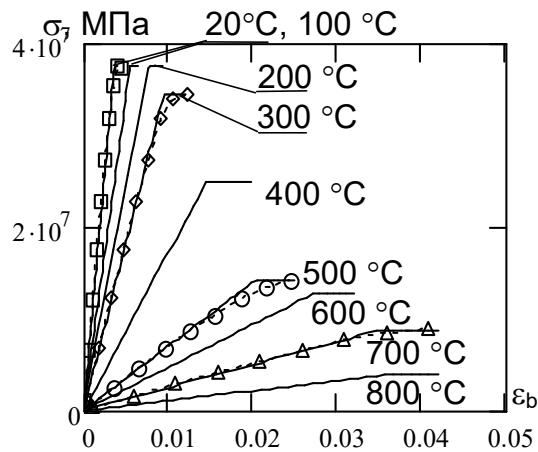


Рис. 5.4 – Діаграми деформування для бетону з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»

5.1.2. Математична модель залізобетонної балки для проведення розрахунку межі вогнестійкості

Описана розрахункова база використана для визначення межі вогнестійкості залізобетонної балки, розрахункова схема якої показана на рис. 5.5.

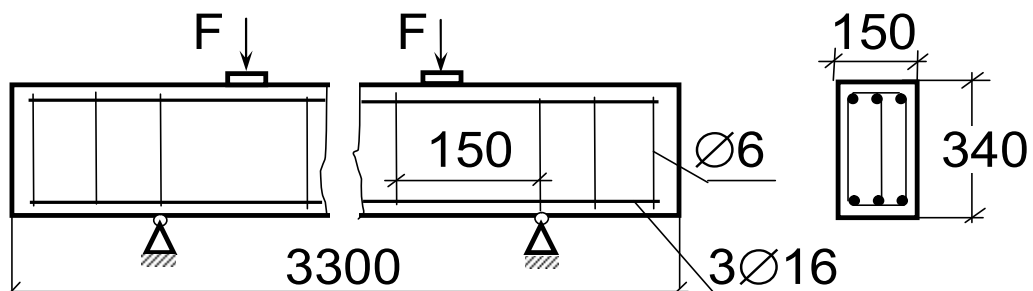


Рис. 5.5 – Розрахункова схема залізобетонної балки для проведення розрахунку вогнестійкості за втратою несучої здатності

Дана балка була обрана для кращої верифікації результатів розрахунку, оскільки відомі результати її вогневих випробувань, наведені в [103].

З використанням комп'ютерної МКЕ-системи ANSYS Multiphysics була побудована КЕ-модель даної балки, показана на рис. 5.6.

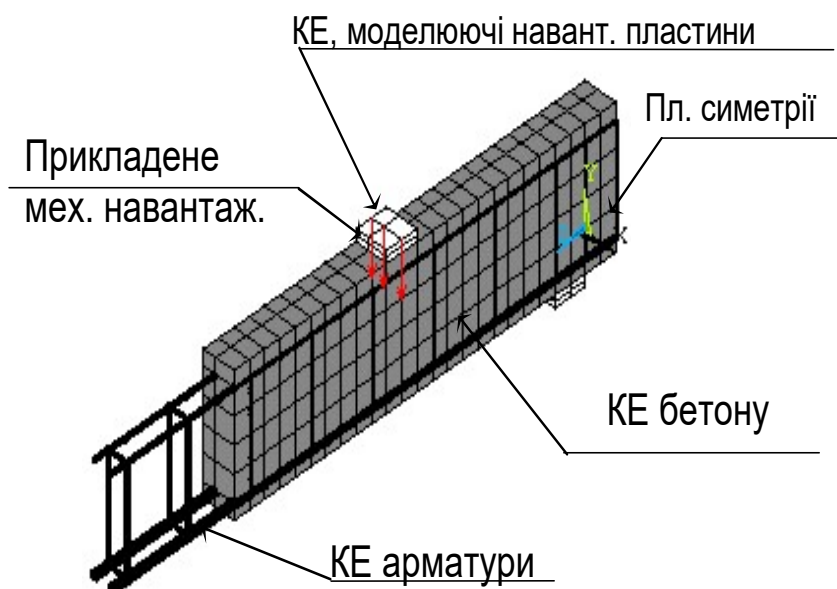


Рис. 5.6 – Кінцево-елементна схема залізобетонної балки для проведення розрахунку вогнестійкості за втратою несучої здатності

Для розрахунку використовувалися параметри КЕ-моделі, зазначені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

Параметри кінцево-елементної моделі залізобетонної балки

Особливість поведінки залізобетону	Методи дослідження математичної моделі	Автор	Джерело
Базові рівняння ПДВ	Розраховані рівняння МКЕ	-	[72]
Пластичні деформації бетону	Полілінійна пружність	-	[72]
Утворення тріщин	Складова критерія міцності бетону	Willam, Warnke	[72]
Фізич. и геом. нелінійності	Ітеративний метод	Newton, Raphson	[72]

На рис. 5.6 показана загальна структурно-логічна схема обліку впливу модифікаторів бетону, при розрахунковому визначенні межі вогнестійкості залізобетонної балки [70].

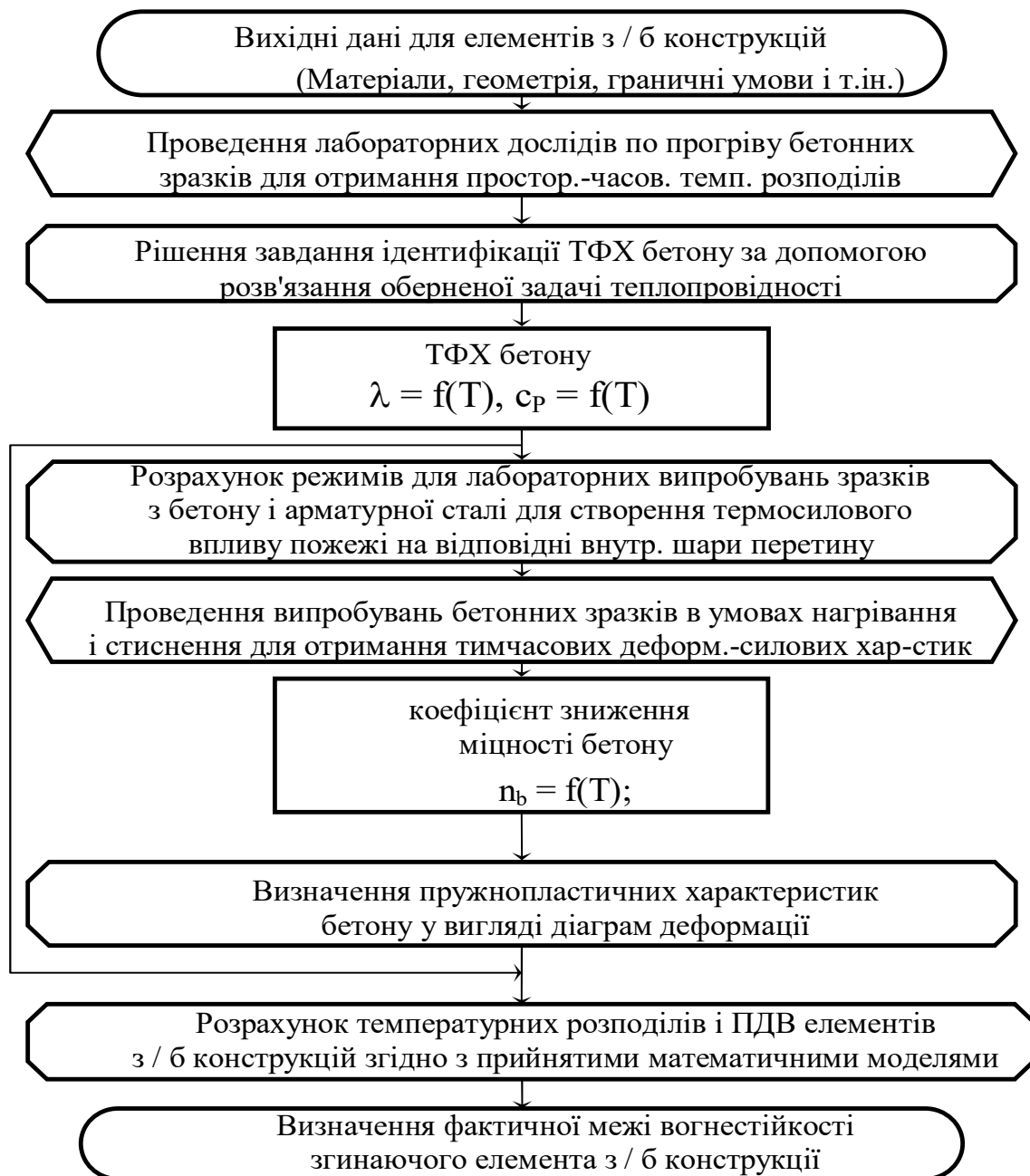


Рис. 5.6 – Структурно-логічна схема методу обліку впливу модифікаторів в складі бетону при розрахунковому визначенні межі вогнестійкості залізобетонної балки

5.1.3. *Результати розрахунку межі вогнестійкості залізобетонної балки з модифікованого бетону.* Провівши розрахунки, були отримані криві максимального прогину в залежності від часу впливу пожежі зі стандартною температурною кривою для бетону з властивостями, що відповідають різним добавкам. На рис. 5.7. показані графіки отриманих кривих.

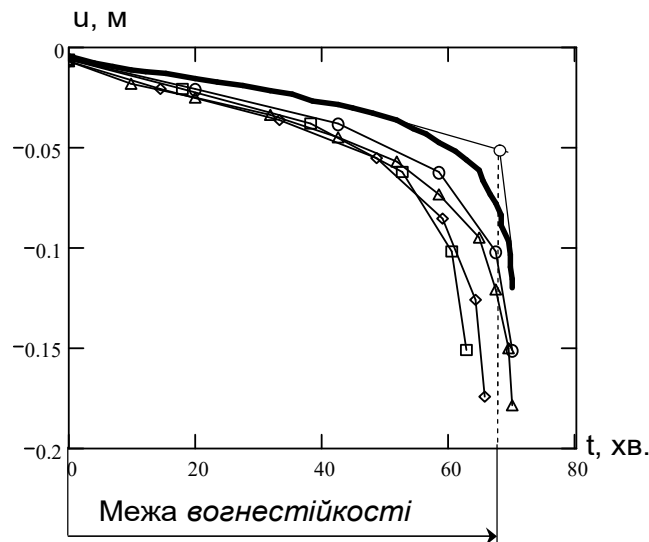


Рис. 5.7 – Графіки прогину залізобетонної балки для бетону з різними модифікаторами: $\circ\circ\circ$ – без добавок;
 $\diamond\diamond\diamond$ – з суперпластифікатором «Coral MasterSILK»;
 $\square\square\square$ – з суперпластифікатором «MasterFIX»;
 $\triangle\triangle\triangle$ – з протиморозною добавкою «Sika Antifreeze»;
— – експериментальні дані [103]

На рис. 5.7. також показаний алгоритм визначення межі вогнестійкості [71] в точці перетину дотичних до кривої максимального прогину в місці її згину внаслідок утворення пластичного шарніра.

У табл. 5.2. наведені значення розрахованої межі вогнестійкості для залізобетонної балки з бетону з різними модифікаторами.

Таблиця 5.2.

Розрахункові межі вогнестійкості для залізобетонної балки з модифікованого бетону

Добавка в бетон	Межа вогнестійкості, хв.	Відхилення від експериментальних значень, хв.	Відхилення від розрахункової межі для бетону без добавок, хв.
експеримент	65	-	-
без добавок	62	3	-
«Coral MasterSILK»	56	9	6
«MasterFIX»	54	11	8
«Sika Antifreeze»	59	6	3

Аналізуючи дані табл. 5.2. можна помітити, що відхилення результатів для однієї і тієї ж балки з бетону з різними модифікаторами від розрахунку для бетону без модифікаторів може становити 11 хв., що складає 18% від межі вогнестійкості. Відсутність обліку даних особливостей може привести до того, що межі вогнестійкості, визначені розрахунковим шляхом, можуть бути істотно завищені, що можливо призведе до високих соціально-економічних збитків. Щоб уникнути даних наслідків є ефективним використання властивостей модифікованого бетону, заснованого на результатах лабораторних випробувань зразків і їх математичної інтерпретації, що дозволяє знайти значення межі вогнестійкості.

5.2. Дослідження адекватності отриманих результатів визначення меж вогнестійкості залізобетонної балки з модифікованого бетону

Для оцінки похибки, що вноситься відхиленням режимів випробувань, а також похибкою показань вимірювального обладнання, використовується метод «обурень» [59] і розрахункова методика, розроблена в п. 5.1.1. та п. 5.1.2. Метод розрахунку полягав в обчисленні необхідних характеристик (ТФХ, механічних властивостей і режимів випробувань) при використанні експериментальних даних з «обуренням», рівним похибки вимірювального обладнання. Результати розрахунку порівнювалися з отриманими раніше результатами для експериментальних даних без «обурення».

Розрахунок проходив в такій послідовності:

- надавалося «збурення» до експериментальної кривої на величину похибки термопари;
- при використанні методики п. 3.5. визначалися ТФХ для кривої з «обуренням»;
- при використанні знову отриманих ТФХ були визначені режими для нагріву зразків для такого згущення сітки, при якому відхилення аналогічних режимів при великих згущення не перевищують 0.001;
- отриманим режимам надавалося «обурення», відповідної сумарної похибки теплового регулятора, і обчислювалися режими прогріву зразків;
- проводилися комбіновані випробування зразків по режимам, розрахованим за кривими з «обуреннями»;
- до результатів випробувань на міцність додавалося значення похибки вимірювань механічних властивостей;
- при використанні методики п. 5.1.1. та п. 5.1.2. за отриманими результатами визначалася несуча здатність колони.

Максимальні відхилення проміжних і кінцевих результатів експериментів при «обуренні», рівних погрішностей вимірювальної апаратури, наведені в табл. 5.3.

Для спрощених методів розрахунку при використанні модифікованого бетону для залізобетонних балок можливе

використання поправочних коефіцієнтів для меж вогнестійкості, визначених за спрощеним розрахунковим, або табличним методом.

Таблиця 5.3.

Відхилення результатів експериментів, обумовлені «збуренням», рівні похибкам вимірювального обладнання

Максимальне відхилення ТФХ		Максимальне відхилення режимів прогріву середини, °С	Максимальне відхилення режимів прогріву камери печі з «обуренням», °С	Максимальне відхилення циліндричної міцності зразків, МПа	Максимальне відхилення межі вогнестійкості	
Коеф. теплопроті, Вт/(м·°С)	Об'ємна теплоєм-сть, Дж/(м ³ ·°С)				абс., хв.	відн., %
0.15	0.11·10 ³	33	9	0.7	3,5	5,8

Використовуючи отримані результати розрахунку, були визначені поправочні коефіцієнти для бетону, модифікованого досліджуваними пластифікаторами і протиморозними добавками. При цьому враховувався можливий вплив похибки вимірювального обладнання. У табл. 5.4. показані обчислені поправочні коефіцієнти [69, 70].

Таблиця 5.4.

Коефіцієнти безпеки для меж вогнестійкості залізобетонної балки з бетону з різними модифікаторами

Добавка	Поправочний коефіцієнт
«MasterFIX»	1,24
«Coral MasterSILK»	1,19
«Sika Antifreeze»	1,12

Таким чином, проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

- розроблена послідовність ідентифікації міцності і пружнопластичних властивостей модифікованого бетону;
- розроблений алгоритм визначення вогнестійкості залізобетонних балок з використанням ідентифікації теплофізичних властивостей і міцності бетону;
- на підставі результатів, отриманих за допомогою вдосконаленого методу, показано, що наявність модифікаторів може призвести до зменшення меж вогнестійкості до 13%;
- отримані результати показали високу ефективність удосконаленого методу, оскільки це дозволяє врахувати технологічну спадковість бетону.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.1-7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – Київ: Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017.
2. ДСТУ Б В.1.1-4-98. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. – Київ: Укрархбудінформ, 2005.
3. Бартеlemi Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1985. -216 с.
4. Федоров В.С. Основы обеспечения пожарной безопасности зданий. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. – 2004. – 176 с.
5. Касперов Г.И., Полевода И.И. Нормативная база по определению огнестойкости железобетонных конструкций // Сборник материалов международной научно – практической конференции «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» Минск : 2001.- С.38-39.
6. Fischer R. Uber Verhalten von Entmortel und beton bei hoheren temperaturen. Berlin, 1970, Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. – P. 214.
7. ДБН В.2.2-9-99. Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення. – Київ: Держбуд України, 1999.
8. Международный стандарт ISO 834. Fire resistance tests – Elements of Building Construction/
9. Европейский стандарт EN 1363-1:1999. Fire resistance tests – Part 1: General requireaenls.
10. Novak S.V., Kharchenko I.A., Krukovsky P.G. An calculation – experimental approach to determination of thermal protection capability of fire resistant coatings // Fire safety in nuclear power plants. Lyon. 1997.
11. Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций – М.: НИИЖБ, 1986. – 40 с.
12. ДБН В_- -2008. Будинки і споруди. Проектування висотних будинків житлово-громадського призначення. – Київ: Держбуд України, 2008.
13. ДБН В 2.2-15-2005 Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення. – Київ: Держбуд України, 2005
14. СНиП 2.09.02-85* Производственные здания. – Москва: Госстрой СССР, 1991.
15. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования.
16. Стандарт США NFPA 251: Standart Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials, 2006 Edition.
17. Стандарт Великобритании BS 476-20: Fire tests on building materials and structures. Test methods and criteria for the fire resistance of elements of building construction, 1987.
18. Стандарт Германии. DIN 4102-5. Fire Behavior of Building Materials and Building Components. 1977.
19. EN 1364-3. Испытание на огнестойкость элементов, которые несут нагрузку. Часть 4. Стены.
20. EN 1364-4. Испытание на огнестойкость элементов, которые несут нагрузку. Часть 4. Колонны.
21. Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА». 2001. – 496 с.
22. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». 2001. – 382 с.

23. Измаилов А.С., Демехин В.Н., Григорян Б.Б. Оценка поведения железобетонных колонн при температурных режимах пожара, учитывающих стадию затухания // Горючесть материалов и обнаружение пожаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986. – С. 33-46.
24. 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).
25. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.
26. Жуков В.В., Панюков Э.Ф. Термостойкость железобетонных конструкций. – К.: Будівельник, 1991.–224 с.
27. Фомин С.Л., Стельмах О.А., Джафар Шакер Шахин. Огнестойкость центрально-сжатых железобетонных элементов. Пожарная безопасность. Организационно техническое обеспечение. – Х.: ХИПБ МВД Украины, 1996. – С. 78 – 81.
28. Романенков И. Г., Зигерн-Корн В. Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов.-М.: Стройиздат, 1984. -240 с.
29. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
30. Гитман Ф.Е., Олимпиев В.Г. Расчет железобетонных перекрытий на огнестойкость. – М.: Стройиздат, 1970. – 232 с.
31. Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости железобетонных строительных конструкций на основе применения ЭВМ. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1975. – 223 с.
32. Разработка методики исследования прочности и деформативности эффективных арматурных сталей при высоких температурах для расчета несущих железобетонных конструкций на огнестойкость: Отчет по теме П-169-73. – М.: ВНИИПО, 1974. – 114 с.
33. Жуков В.В., Молчадский И.С., Лавров В.Н. Определение расчетными методами пределов огнестойкости железобетонных конструкций // Пожарная безопасность. – 2005. – № 5. – С. 37-42.
34. Ваничев А.П. Приближенный метод решения задач нестационарной теплопроводности при переменных константах. – М.: Изд-во АН СССР. – ОТН, 1946. № 12. С. 167 – 174.
35. Пчелинцев В.А., Кузьмин И.И. Расчет прогрева строительных конструкций при высокотемпературном воздействии методом конечных элементов. Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1991. – С. 34 – 37.
36. Власова Е.А., Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Приближенные методы математической физики: Учебн. для вузов/ Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001. – 700 с.
37. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. -М.: Мир, 1975. – 318 с.
38. Моделирование пожаров и взрывов / Под ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – 492 с.
39. Кошмаров Ю.А. Новые методы расчета огнестойкости и огнезащиты современных зданий и сооружений // Пожарная безопасность. – 2002. – № 2. С. 91–98.
40. Давыдкин Н.Ф., Каледин В.О., Страхов В.Л. Оценка огнестойкости зданий и сооружений на основе компьютерного моделирования // Математическое моделирование. – 2000. – С. 27–32.
41. Страхов В.Л., Мельников А.С., Рудаков А.П., Смирнов Н.В. Пути повышения эффективности огнезащиты строительных конструкций и воздуховодов. – Пожарная безопасность. – 2004. – № 3. – С. 64-68.

42. Афанасьев Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы. / Афанасьев Н.Ф., Целуйко М.К. – К.: Будівельник. – 1989. – 128 с.
43. Давыдкин Н.Ф., Страхов В.Л. Огнестойкость конструкций подземных сооружений / Под ред. И.Я. Дормана. – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 1998. – 296 с.
44. Rubini. P., SOFIE – Simulation of Fires in Enclosures, V 3.0 Users guide, School of Mechanical Engineering, Granfield University (UK), 2000.
45. Добавки в бетон: Справ. пособие / В. С. Рамачандран, Р. Ф. Фельдман, М. Коллепарди и др.; Под ред. В. С. Рамачандрана; Пер с англ. Т. И. Розенберг и С. А. Болдырева; Под ред. А. С. Болдырева и В. Б. Ратинова.—М.: Стройиздат, 1988.—575 с.
46. Яковлев А.И. О расчете огнестойкости стальных конструкций на основе применения ЭВМ // Огнестойкость строительных конструкций: Сб. тр. – ВНИИПО. – М.: ВНИИПО, 1973. № 1. – С. 2-18.
47. Григорян Б.Б. Огнестойкость сжатых железобетонных элементов при температурных режимах близких к реальным: Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Харьков 2001.
48. Фомін С.Л. Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д.т.н., Харків 1997. – 38 с.
49. Чихладзе Є.Д., Веревичева М.А., Жакин И.А. Несущая способность сталебетонных колонн при нагреве./ В кн. Будівельні конструкції. Т.1. 2005. – С. 380-385.
50. Ахвердов И.Н., Смольский А.Е., Сочеляс В.В. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. – Минск: Наука и техника, 1973. – 232 с.
51. Соломин В.М. Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 128 с.
52. Предупреждение дефектов в строительстве. Защита материалов и конструкций / А. Грассник, Э. Грюн, В. Фикс, в. Хольцапфель, Х. Ротер. Пер. с англ. – 1981. –184 с.
53. Fischer R. Uber Verhalten von Entmortel und beton bei hoheren temperaturen. Berlin, 1970, Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. – P. 214.
54. Fischer R., Welgler H. Beton bei temperaturen von 100 bis 750 °C, Darmstadt, 1967. – P.283.
55. EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1. Actions on structures. Actions on structures exposed to fire.
56. EN 1991-1-1:2002 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings.
57. Полевода И.И., Кандер Н.А. Критическая температура в расчетах пределов огнестойкости железобетонных конструкций. // Пожарная и техногенная безопасность: Тезисы докладов международной научно-практической конференции. – Черкассы: ЧИПБ им. Героев Чернобыля МЧС Украины, 2005. – С. 323 – 326.
58. Phan L.T., Carino N.J. Code provisions for high strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures // Material and Structures.- Brussels: CEN, 2001. – 102 p.
59. Некора О.В. Расчетно-экспериментальный метод определения огнестойкости сжатых элементов железобетонных строительных конструкций: Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Черкассы 2007.
60. Яковлев А.И., Григорян Б.Б. Расчетная оценка поведения железобетонных колонн при режимах пожара, отличных от «стандартного» // Тепло- и массообмен в технологических процессах производства и при пожарах: Сб. научн. тр. ВИПТШ МВД СССР. – М., 1983. – с. 147-153.

61. Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. Огнестойкость зданий / Под общ. ред. В.А. Пчелинцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1970. – 262 с.
62. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Высшая школа, 1991. – 630 с.
63. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
64. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
65. Башкирцев М.П., Бубырь Н.Ф., Минаев Н.А., Ончуков Д.Н. Основы пожарной теплофизики. – М.: Стройиздат, 1984. – 200 с.....
66. Новак С.В. Вогнезахисна здатність гіпсокартонних плит ГКПО для несучих внутрішніх стін / Новак С.В., Довбиш А.В. // Мат-ли VII Всеукр. наук.-практ. конф-ї рятувальників. – К.: УкрНДІПБ МНС України, 2005. – С. 335–337.
67. Поздеев С.В. Удосконалення методики випробувань залишкової несучої здатності залізобетонних колон після пожежі/ Поздеев С.В., Григор'ян Б.Б., Поздеев А.В. // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Ч.: Харківський університет ПС. – 2005.– Вип. 7(47). – С. 133-143.
68. 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. Сборник научных трудов. – Харьков: АГЗУ, 2006. – Выпуск 19. –С. 111 – 116.
69. 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: Збірник наукових праць. – Львів: ЛДУБЖД, 2006. – № 9. – С. 125 – 132.
70. Поздеев С.В. Обоснование методики расчета температурных режимов прогрева камеры печи при комбинированных испытаниях бетонных образцов/ Поздеев С.В., Некора О.В., Григор'ян Б.Б., Поздеев А.В.// Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. – Київ: УкрНДІПБ, 2006. – № 2 (14). – С.140 – 147.
71. Поздеев С.В. Экспериментально-расчетный метод построения диаграмм деформирования бетона при высоких температурах / Поздеев С.В. // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевськ : ДонДТУ. – № 33. – 2011. – С. 275–283.
72. 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.
73. Некора О.В. Исследование эффективности математических моделей для решения теплотехнической задачи при определении огнестойкости железобетонных конструкций/ Некора О.В., Поклонский В.Г., Поздеев А.В.// Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. Вып. 52 в 2-х частях – Дн-вск, ГВУЗ ПГАСА, 2010. – С. 44-48.
74. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром. – М.: Стройиздат, 1987. – 80 с.
75. Фомин С.Л., Стельмах О.А., Джафар Шахер Шахин. Огнестойкость центрально-сжатых железобетонных элементов. Пожарная безопасность. Организационно техническое обеспечение. – Х.: ХИПБ МВД Украины, 1996. – С. 78 – 81.

76. Предупреждение дефектов в строительстве. Защита материалов и конструкций / А. Грассник, Э. Грюн, В. Фикс, в. Хольцапфель, Х. Ротер. Пер. с англ. – 1981. – 184 с.
77. Фомин С.Л. Моделирование тепло- и влагопереноса в железобетонных конструкциях при воздействии климатической, технологической и пожарной сред // Электронное моделирование. – 1999.- Т.21. – № 4. – С. 28 – 32
78. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. – 2000.
79. EN 13501-1:2002 “Fire classification of construction products and building elements” – Part 1.2. European Committee for Standardization, Brussels 2002.
80. Демехин В.Н., Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф. и др. Здания и сооружения и их устойчивость при пожаре. – М.: ГПС МЧС России, 2003. – 656 с.
81. Яковлев А.И., Стороженко Т.Е. Огнестойкость одноэтажных производственных зданий в зависимости от пожарной нагрузки // Промышленное строительство. – 1979. № 9. – С. 37-39.
82. Башкирцев М.П. "Исследование температурного режима при пожарах в зданиях на моделях": Труды Высшей школы МВД, НИРЧО, М., 1966. – № 13. – С.51-58.
83. Коляков М.И., Демчина Б.Г., Лундяк В.С., Божинський О.В. Методика і результати натурних вогневих випробувань сучасних облежених конструкцій західних технологій // Збірник тез першої всеукраїнської науково-технічної конференції “Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону” – К.: 1996. – С. 148-149.
84. Молчадский И.С., Гомазов А.В., Зотов С.В. Расчет эквивалентной продолжительности пожара для основных строительных конструкций // Поведение строительных конструкций в условиях пожара. – М.: ВНИИПО, 1987. – С. 60 – 68.
85. Стороженко Т.Е., Федоров В.В., Измаилов А.С. Оценка пожарной опасности производственных зданий и помещений на основе пожарной нагрузки: Реферативная информация. – М.: ЦНИИСК, 1978. – Серия IV. – Вып. 9.
86. Олимпиев В.Г., Зенков Н.И. Исследование прочностных и деформативных свойств тяжелого силикатного бетона при воздействии высоких температур // Огнестойкость строительных конструкций. – Сб. тр. ВНИИПО МВД СССР – М.: ВНИИПО, 1975. Вып. 3. – С. 24-36.
87. Яковлев А.И. Огнестойкость железобетонных конструкций // Пожарная профилактика и тушение пожаров. Информационный сборник ВНИИПО. – М.: Стройиздат, 1970. № 6.- С. 18 – 26.
88. Lie T.T., characteristic temperature curves for various fire severities. "Fire Technol", 1974, 10, № 4. – P. 315-326.
89. Rubini. P., SOFIE – Simulation of Fires in Enclosures, V 3.0 Users guide, School of Mechanical Engineering, Granfield University (UK), 2000.
90. Gerhardt H. Design Method of Smoke and Heat exhaust Systems in construction Works. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 127-140.
91. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 141-150.
92. Krukovsky P. Fire Safety Analysis for new Safe confinement’s Building Constructions of Chernobyl NPP. Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 223-227.

93. Домокеев А.Г. Строительные материалы. Учебник для строит. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа. 1989. – 495 с.
94. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции: Общий курс. Учебник для вузов – 4-е издание перераб. – М.: Стойиздат, 1985. – 728 с.
95. Метод конечных элементов в механике твердых тел / [Сахаров А.С., Кислокий В.М., Киричевский В.В. и др.] ; под ред. А.С. Сахарова, И.А. Альтенбаха. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.
96. Соломин В.М. Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций. – М.: Машиностроение. 1980. – 128 с.
97. Ильин Н.А. Техническая экспертиза зданий, поврежденных пожаром. – М.: Стройиздат. – 1983. – 200 с.
98. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат. – 1979. – 128 с.
99. Зенков Н.И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара: Учебник для слушателей вузов. – М.: ВИПТШ, 1974. – 176 с.
100. Kowalski R., Górska B. Badanie zmian strukturalnych betonu narażonego na działanie wysokich temperatur. Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 315–322.
101. Fischer R., Welgler H. Beton bei temperaturen von 100 bis 750 °C, Darmstadt, 1967. – P.283.
102. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
103. Милованов А.Ф. Расчет жаростойких железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1975. – 128 с.
104. Lea F.C. Comportement du beton entre 80 et 300 °C, 1976, №18. – P. 136.
105. Некрасов К.Д. Жароупорный бетон. – М.: Промстройиздат, 1957. – 168 с.
106. Pamine-cement et comportment an fen. Rev, Techn. Fen., 1974, v. 15, N 141. – P. 29-36.
107. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
108. Яковлев А.И., Апостолов А.Т. Расчет предела огнестойкости сжатых армосиликатобетонных конструкций с учетом деформативности нагретого бетона на основе использования ЭВМ./ В. кн. Огнестойкость строительных конструкций. Вып. 2. 1974. – С. 3-24.
109. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Ереван, 1965. – 257 с.
110. Фомин С.Л. Полная диаграмма “ σ - ϵ ” бетона и арматуры при нагреве. Коммунальное хозяйство городов. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – К.: Техніка, 1997. Вып. 8. – С.27-29.
111. Олимпиев В.Г., Зенков Н.И., Сорокин А.Н. Исследование прочности и деформативности легкого бетона при высоких температурах/ В. кн. Огнестойкость строительных конструкций. Вып. 4. 1976. – С. 23-32.
112. Kosiorek M., Woźniak G. Projektowanie elementów żelbetowych i murowych z uwagi na odporność ognia. Warszawa. – 2005.
113. Федоров С.С., Узун И.А. Развитие теории прочности бетона. – Моделирование и оптимизация в материаловедении. – Материалы 44-го международного семинара по моделированию и оптимизации композитов – МОК’ 44. – 2005. – С. 170.
114. Заряев А.В., Лукин А.Н., Зайцев А.М. Исследование прогрева строительных и отделочных материалов при пожаре для оценки выхода токсичных летучих веществ. – Пожарная безопасность. – №6. – 2004. С. 53-56.

115. Ройтман. В.М., Зырина Г.Н. Решение теплотехнической задачи огнестойкости конструкций с учетом процессов влагопереноса на ЭВМ по неявной конечно-разностной схеме./ В. кн. Огнестойкость строительных конструкций. Вып. 2. 1974. – С. 58-71.
116. Романенков И. Г., Зигерн-Корн В. Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов.-М.: Стройиздат,1984. -240 с.
117. Давыдкин Н.Ф., Каледин Вл.О., Страхов В.Л. Оценка огнестойкости зданий и сооружений на основе компьютерного моделирования. – Математическое моделирование. – 2000. – С. 27-32.
118. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход). – К.: НАНУ Институт технической теплофизики. 1998. – 224 с.
119. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций/ Под ред. Ю. А. Кошмарова. – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 2000. – 433 с.
120. Страхов В.Л., Мельников А.С., Рудаков А.П., Смирнов Н.В. Пути повышения эффективности огнезащиты строительных конструкций и воздуховодов. – Пожарная безопасность. – №3. – 2004. С. 64-68.
121. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал. УРСС, 2003. – 784 с.
122. Harmathy T.Z. Fire resistance versus flame spread resistance. – Fire Technol., 1976, v. 12, N 4. – P. 290-302,
123. K. Oden. – Fire resistance of glued, laminated timber structures. Fires. Res.. Org. Simp. n° 3. Paper n° 2. H.M. Stationery Offise. London England pp. 7-15, 1970.
124. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория переноса энергии и вещества. – Минск: АН БССР, 1959 – 330 с.
125. Зенков Н.И., Зависнова Л.М. Прочность и деформативность бетона на гранитном заполнителе при действии высоких температур // Огнестойкость строительных конструкций: Сб. тр. ВНИИПО МВД СССР.- М.: ВНИИПО, 1977. Вып. 5. – С. 88-93.
126. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
127. Кошмаров Ю.А. Новые методы расчета огнестойкости и огнезащиты современных зданий и сооружений. – Пожарная безопасность. – №2. – 2002. С. 91-98.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГУ – граничні умови.

СВ – ступінь вогнестійкості

МВ – межа вогнестійкості

ФМВ – фактична межа вогнестійкості.

МКЕ – метод кінцевих елементів.

ОЗТ – обернена задача теплопровідності.

ПЗТ – пряма задача теплопровідності.

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь.

ТФХ – теплофізичні характеристики.

НДС – напружено-деформований стан.

Наукове видання

**Олександр Михайлович Тищенко
Андрій Валерійович ШВИДЕНКО
Сергій Валерійович ПОЗДЄЄВ
Віталій Михайлович НУЯНЗІН
Аліна Юріївна НОВГОРОДЧЕНКО**

**ВПЛИВ МОДИФІКАТОРІВ БЕТОНУ
НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Монографія

Підписано до друку 15.10.2018.
Ум. друк. арк. 6,75. Обл.-вид. арк. 4.
Тираж 30 прим. Замовлення № 90.
ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034