

УДК 624.012

О.М. Нуязін, Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля,
С.В. Поздеев, д.т.н., доц., В.М. Андрієнко, к.і.н., доц.,
С.А. Єременко, к.т.н., доц., ІДУЦЗ

ДОСЛІДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У роботі досліджується адекватність математичних моделей вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою програмного комплексу FlowVision 2.5. Проведено порівняння результатів, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання випробувань на вогнестійкість у вогневих печах, з експериментальними даними. Показано відповідність результатів моделювання у середовищі CFD програм даним реальних випробувань.

Ключові слова: моделювання, вогнестійкість, обчислювальна газогідродинаміка (CFD), FlowVision 2.5.

Постановка проблеми. Оцінка вогнестійкості елементів будівель визначається стандартними випробуваннями в спеціальних вогневих установках [1,2]. Важливо, щоб дослідження відповідали однаковим стандартним умовам випробувань, у якій би з лабораторій ці дослідження не проводилися. Проте, існуючі методи стандартизуються лише на температурно-часових кривих термопари печі, і, до того ж, конструкції та дизайн стандартних печей значно відрізняються один від одного. Тому існують істотні розбіжності в розумінні поняття «вогнестійкість». У даній статті досліджується застосування обчислювальної газогідродинаміки (CFD) для створення адекватної моделі вогневої печі для випробувань залізобетонних будівельних конструкцій.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Стандартні методи вогневих випробувань достатньо добре вивчені і їм присвячено багато робіт [3-7], де висвітлені основні аспекти вогневих випробувань на вогнестійкість несучих залізобетонних конструкцій, але в даних роботах недостатня увага приділяється вивченню метрологічних характеристик випробувальних установок та впливу конструктивних особливостей цих установок на адекватність отриманих результатів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Існує багато конструкцій печей, які розрізняються геометричними конфігураціями, видом паливно-форсуночної системи, схемами розташування та конструкцією вимірювальної арматури. Це може призвести до того, що різні випробувальні установки можуть давати результати, які відрізняються на 30 і більше відсотків. Якщо йдеться про час, що визначає настання граничного стану, а це фактично час, який потрібен для евакуації людей та матеріальних цінностей, то для REI 60 відхилення може складати близько 20 хвилин, REI 120 – 40 хвилин, REI 150 – 50 хвилин. Це значний проміжок часу, в якому визначається межа вогнестійкості тією чи іншою лабораторією і при цьому немає гарантій, що це не може бути дуже завищений результат. У такому випадку не можна гарантувати безпеку людей та матеріальних цінностей у відповідності до існуючих нормативів. І тому питання удосконалення характеристик для вогневих випробувань є актуальним і важливим.

У роботі [3] ми проаналізували методи, якими можливо дані дослідження здійснити. І через велику вартість та трудомісткість випробувань в спеціальних установках вирішили проводити чисельні експерименти за допомогою комп'ютерного моделювання.

Часто теоретичні розрахунки не можуть дати повної впевненості у правильності передумов для проектування нових конструкцій вогневих печей і тоді на допомогу приходять теорія моделювання. Моделювання, як метод наукового дослідження дає

можливість, не виконуючи установок в натурі, без будь-яких великих матеріальних затрат на моделях проводити всі необхідні досліди щодо визначення ефективності створених конструкцій і вносити необхідні зміни у моделі для доведення її до найвигіднішої.

Постановка задачі та її розв'язання. Створити математичну модель горизонтальної вогневої печі на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса. Перевірити адекватність створеної моделі. Відповідно до результатів проведених чисельних експериментів зробити висновки щодо показників температури у камері печі, термопарі та досліджуваному зразку. Виділити особливості, які можуть впливати на результати випробувань у вогневих печах.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Стандартизовані методи описують температурно-часові залежності, які встановлюються під час проведення випробування, і при яких температура вимірюється термопарами, розміщеними в печі, біля зразка. Проте, хоча використовуються стандартизовані методи, сам дизайн і характеристики печей для дослідження істотно відрізняються [3,4]. Оскільки результати дослідження багато в чому залежать від конструкції печі, не представляється реальним той факт, що існуючі печі мають бути модифіковані, щоб відповідати одному конструктивному улаштуванню.

Як було відзначено у роботах [5,6] сучасне програмне забезпечення, зокрема моделювання теплових процесів засобами комп'ютерної газодинаміки (CFD), дозволяє врахувати всі необхідні параметри досліджуваних процесів та дослідити вплив геометричних та конструктивних характеристик печі для випробувань залізобетонних конструкцій на адекватність результатів. Однією з основних переваг обчислювальної газогідродинаміки є можливість порівняння конструкції різних печей. Часто це обходиться набагато дешевше, ніж еквівалентні експериментальні випробування.

Одним з представників CFD програм є комплекс FlowVision 2.5 компанії «ТЕСИС». FlowVision 2.5 можна використовувати для порівняння різних печей при пожежних дослідженнях, забезпечуючи докладний опис режиму передачі тепла, що впливає на досліджуваний зразок. Тому FlowVision може бути використаний для порівняння різних печей, з урахуванням їх відповідності обраному стандартному режиму дослідження. У даній статті описано застосування обчислювальної газогідродинаміки для моделювання повномасштабної вогневої печі відповідно до [1,2] на основі описаної там стандартної температурної кривої.

Температура в печі вимірюється термопарами не менше, ніж у п'яти місцях. При цьому на кожні 1,5 м отвору печі, що призначена для випробування огорожувальних конструкцій, та на кожні 0,5 м довжини або висоти печі, що призначена для випробування стержневих конструкцій, має бути встановлена одна термопара. Вимірювальний спай термопар необхідно встановлювати на відстані від 90 до 110 мм від поверхні зразка. Відстань від вимірювального спаю термопар до стінок печі має бути не менше 200 мм [1]. У даній роботі температура контролюється однією змодельованою термопарою, у 36 місцях всередині камери печі та на досліджуваному зразку.

Температура, яку реєструє термопара печі, залежить від декількох факторів. Враховується конвективний і радіаційний теплообмін поверхні термопар і простору камери печі. На практиці термопара підлаштовується до температури, яка забезпечує баланс між теплом, індукованим конвективно і теплом, що виділяється при випромінюванні.

У теоретичній базі системи FlowVision 2.5 [8] розвинений узагальнений підхід, заснований на усереднюванні за часом (усереднювання за Рейнольдсом) повної системи рівнянь Нав'є-Стокса. Для вирішення системи рівнянь застосовується процедура корекції тиску обмеженого об'єму для вирішення оціночних рівнянь Нав'є-Стокса регулювання густини у загальній системі координат. Застосовується стандартна вихрова модель k-ε. Горіння пояснюється припущенням, що швидкість зниження тепла обмежується вихровим змішуванням палива і окислювача. В табл. 1 вказані параметри математичних моделей згідно з номенклатурою FlowVision 2.5.

Таблиця 1 – Параметри математичних моделей газодинаміки печі для випробувань на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій згідно номенклатури FlowVision 2.5

№ п/п	Математична модель	Теоретична база	Назва моделі згідно номенклатури FV 2.5
1.	Модель механіки руху газів	Система рівнянь Нав'є-Стокса	Модель двофазного горіння
2.	Модель газу	Ідеальний газ	Швидкість
3.	Модель теплопереносу	Рівняння енергії	Енергія
4.	Модель турбулентності	Стандартна k - ε	Турбулентність Стандартна модель k-ε
5.	Модель реагуючого потоку	Двофазний потік рідких частинок	Частинки
6.	Модель хімічної реакції	Одноступінчата хімічна брутто-реакція формула	5 газів
7.	Модель горіння	Модель Магнуссена (турбулентна модель)	Модель горіння Магнуссена
8.	Модель випромінювання газу в об'ємі.	Дифузна модель (P1)	Випромінювання Дифузна модель (P1)
9.	Модель теплопередачі в твердих тілах	Рівняння теплопровідності	Твердий матеріал Енергія
10.	Модель радіаційного теплообміну між поверхнями моделей	Рівняння радіаційного теплопереносу	ПП випромінювання
11.	Метод чисельної реалізації	Метод контрольних об'ємів	Базовий метод реалізації розрахунку FV 2.5

Моделювання установки для випробувань на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій.

Для побудови математичної моделі були використані такі принципи:

1. При побудові моделі і проведенні обчислювального експерименту застосовано програмний комплекс FlowVision 2.5.

2. Як інструмент для побудови геометрії моделі використано програмний комплекс SolidWorks.

3. В процесі обчислювального експерименту враховується конвективний і радіаційний теплообмін поверхні зразка для випробувань і простору камери печі.

Необхідно виділити деякі особливості побудови геометричної моделі:

1. Використано розміри реально існуючої вогневої печі.

2. Поверхні, що сполучаються (камера печі та залізобетонна плита) побудовані на відстані близько 100 мм, для коректної роботи моделі після того, як буде створено розрахункова сітка.

3. В камері передбачається модель термопари у вигляді стержня довжиною 100 мм і діаметром 6 мм.

4. Модель термопари відповідно до [1], знаходиться на відстані 100 мм від залізобетонної стіни.

Далі створена геометрична модель імпортується в середовище програмного комплексу. За допомогою можливостей програми задаються всі необхідні параметри: матеріали, з яких виготовлено досліджуваний зразок та термопару, модель горіння, параметри палива та окислювача та ін.

На рис. 1 показана геометрична конфігурація горизонтальної печі, яка використовується для проведення вогневих випробувань.

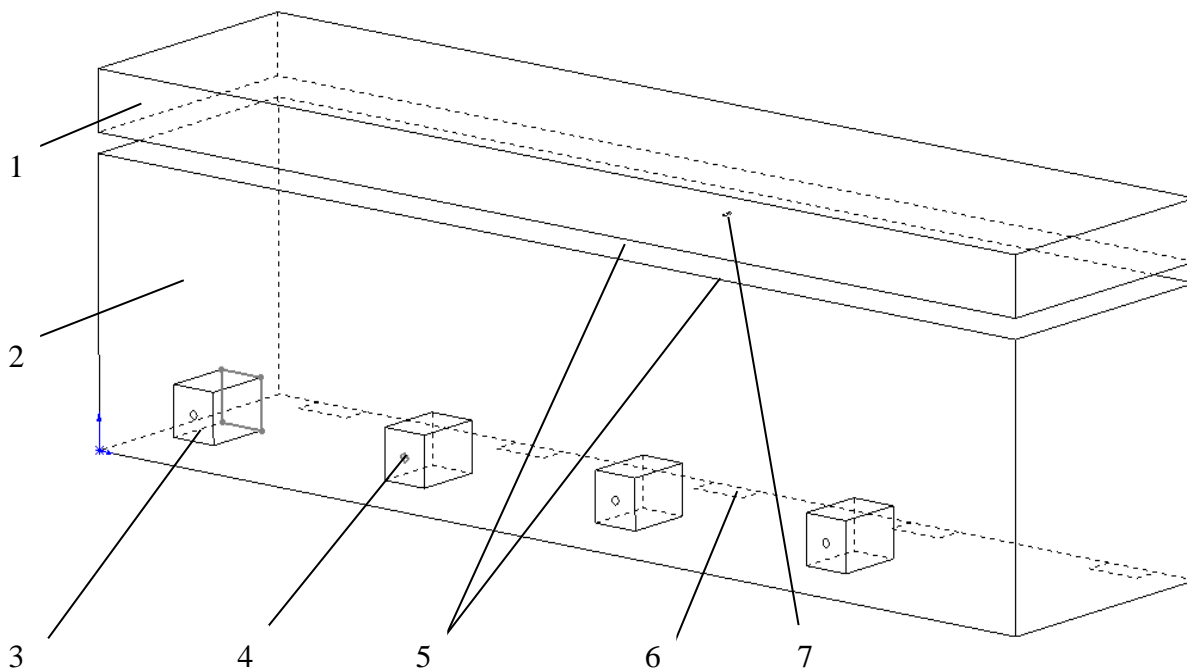


Рисунок 1 – Геометрична конфігурація горизонтальної печі (показано лише симетричну половину): 1 – залізобетонна плита; 2 – огороження печі; 3 – регіон вдуву; 4 – регіон форсунки; 5 – поверхні, що сполучаються; 6 – регіон виходу продуктів горіння; 7 – модель термомпари.

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

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

З цією метою було побудовано сіткову модель простору горизонтальної печі (рис. 2). Для того щоб врахувати конвективний і радіаційний теплообмін поверхні термомпари і простору камери печі адаптивну сітку для термомпари було значно подрібнено. Таким чином, результати моделювання у програмі CFD FlowVision 2.5 якнайкраще наближаються до реальних.

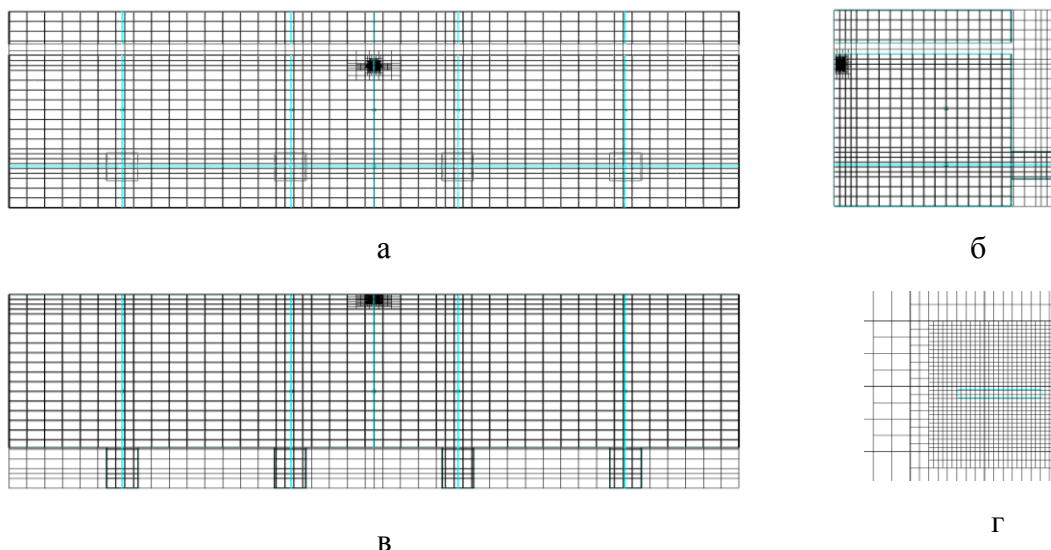


Рисунок 2 – Сіткова модель простору горизонтальної печі (показано лише симетричну половину): а – вид по осі у; б – вид по осі х; в – вид по осі z; г – адаптована сітка для термопар (вид на бокову поверхню термопар).

Дані щодо температури знімалися щосекунди всередині змодельованої термопарі, в 9-ти місцях всередині камери печі та в 27-ми місцях всередині стіни, як показано на рис. 3.

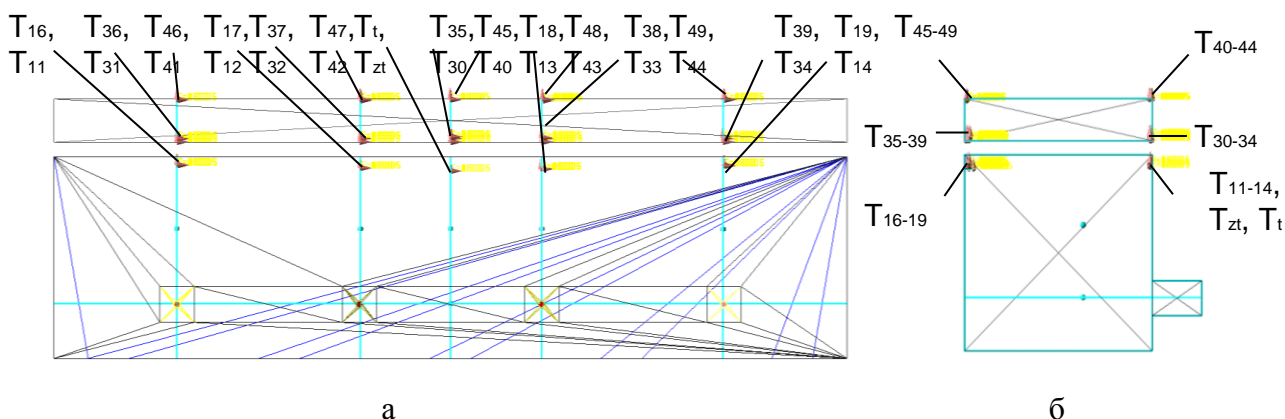


Рисунок – 3 Місця, де відбувався контроль температури (показано лише симетричну половину): $T_{11} - T_{44}$ – місця, у яких відбувався контроль температури; а – вид по осі X; б – вид по осі Z.

Результати обчислювального експерименту. Правильний рух газів в камері печі має дуже важливе значення для проведення вогневих випробувань. Для забезпечення необхідної температури потрібно подавати в необхідній кількості окисник (повітря) та своєчасно видаляти продукти згорання.

Нагрів за стандартною кривою відбувається ступінчастим способом за допомогою системи форсунок, що періодично включаються. Вона складається з системи подачі палива і 8-ми форсунок (рис. 1). Форсунки представляють собою стандартні розпилювальні пристрої низького тиску механічного типу з витратою палива від 3 до 60 кг/год.

Тепловий процес представляє собою згорання розпорошених форсункою часток гасу в нагрівальних каналах (рис. 1) і частково в камері печі. Розташування каналів обумовлює циркуляцію гарячого повітря з продуктами згорання у камері печі і видалення останніх через димовий люк.

В табл. 2 зведені початкові параметри граничних умов вогневої печі і залізобетонної плити при її випробуванні на вогнестійкість.

Таблиця 2 - Початкові параметри граничних умов вогневої печі і залізобетонної плити при її випробуванні на вогнестійкість

№ з/п	Підобласть	Регіон підобласті	Тип граничної умови згідно з номенклатурою FlowVision 2.5	Параметр	Одиниці вимірювання	Величина	
1.	Простір печі	Огородження печі	Стінка	Щільність енергії випромінювання	Радіаційний потік розраховується		
		Регіон вдуву	Вхід/вихід	Температура	°C	25	
				Швидкість	кг/(м ² с)	3	
				ТурбЕнергія		0,03	
				ТурбДиссипація		0,001	
				О ₂ Відновл.		0,23333	
		Регіон форсунки	Стінка	Тип ГУ	част.+норм. скор		
				Потік часток	кг/с	зм. від 0,0013 до 0,008	
				Температура част.	°C	25	
				Діаметр часток	м	0,0001	
				Масова частка		1	
				Чорнота часток		0,5	
				Нстарт точок		100	
				Швидкість часток	м/с	10	
		Регіон димового люку	Вільний вихід	За умовчанням			
Бічна поверхня плити	Поєднане	Тип ГУ	L-поєднання				
Торцеві поверхні плити	Симетрія	По умовчанням					
Торцева поверхня з боку спаю і бокова поверхня термопар	Поєднане	Тип ГУ	L-поєднання				
Торцева поверхня термопар	Симетрія	За умовчанням					
2.	Плита	Обігрівна поверхня плити	Поєднане	Тип ГУ	L-поєднання		
		Необігрівні поверхні плити	Симетрія	За умовчанням			
3.	Термопара	Торцева поверхня з боку спаю і бокова поверхня термопар	Поєднане	Тип ГУ	L-поєднання		
		Торцева поверхня термопар	Симетрія	За умовчанням			

Контроль температури в камері здійснюється моделлю термопар, відповідно до [1].

Для побудови моделі теплопередачі в залізобетонній плиті і термопарі були використані теплофізичні характеристики, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Теплофізичні характеристики матеріалів і умови конвективного і радіаційного теплообміну

№, з/п	Характеристика	Одиниці вимірювання	Величина	Джерело
Теплофізичні характеристики матеріалу плити (бетон)				
1.	Коефіцієнт теплопровідності	Вт/(м ² ·К)	1,2 – 0,00035·Т	[9]
2.	Питома теплоємність	Дж/(кг·°С)	710 + 0,83·t	[9]
3.	Густина	кг/м ³	2300	[9]
4.	Ступінь чорноти	-	0,85	[9]
Теплофізичні характеристики матеріалу термопари (сталь)				
1.	Коефіцієнт теплопровідності	Вт/(м ² ·К)	45	[9]
2.	Питома теплоємність	Дж/(кг·°С)	450	[9]
3.	Густина	кг/м ³	7000	[9]
4.	Ступінь чорноти	-	0,7	[9]
Загальні величини				
5.	Стала Стефана-Больцмана	Вт/(м ² ·К)	5,67·10 ⁻⁸	[9]

Під час проведення обчислювального експерименту контроль температури відбувався так, щоб температурний режим нагріву термопари по можливості точно співпадав з температурною стандартною кривою пожежі і не виходив за допустимі межі випробування [1]. Для цього засобами контролю системи FlowVision 2.5 в інтерактивному режимі знімалися поточні дані з термопари, і, при досягненні максимальної температури для певного кроку за часом, параметри процесу горіння змінювалися (табл. 2). Дані щодо температури у місцях, вказаних на рис. 3, фіксувалися щосекунди для досягнення необхідної точності при побудові графіків.

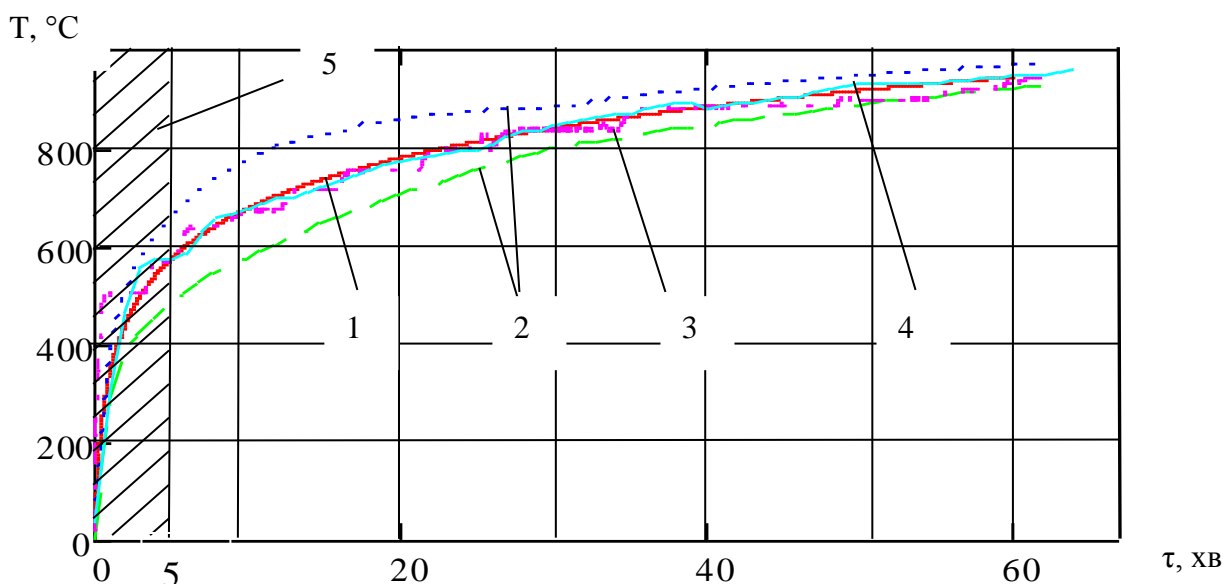


Рисунок 4 - Температурні криві нагріву простору камери печі на усьому часовому проміжку випробувань: 1 – стандартна температурна крива пожежі; 2 – граничні криві відхилення показників термопар від стандартної температурної кривої пожежі; 3 – середня температура у камері змодельованої установки; 4 – усереднене значення показників термопар при випробуваннях; 5 - проміжок часу, протягом якого відхилення середньої температури не контролюється [1].

З метою отримання відпрацьованої методики обчислювального експерименту були проведені попередні розрахунки для створеної моделі і отримані такі граничні умови і

параметри обчислювального процесу, при яких досягається оптимальна продуктивність розрахунку і адекватність його результатів.

При застосуванні параметрів обчислювального процесу, вказаних в табл. 2, 3, була отримана температурно-часова крива контрольних значень температури в термопарі, яка показана на рис. 4. Коливання кривої показників змодельованої термопарі в межах 15 - 20°C обумовлено флуктуаціями, викликаними турбулентністю процесу масопереносу.

Аналіз графіків рис. 4 показує, що найбільші взаємні відхилення кривих, побудованих за даними випробувань і результатам моделювання, виникають на початкових етапах випробувань в межах 10 – 20 хв. При цьому на графіках видно, що відхилення результатів розрахунку від результатів експериментів незначне, що говорить про високу ефективність моделювання.

На рис. 5 показано графік зміни показів температури термопарі та у 10-ти місцях, показаних на рис. 3, за час обчислювального експерименту.

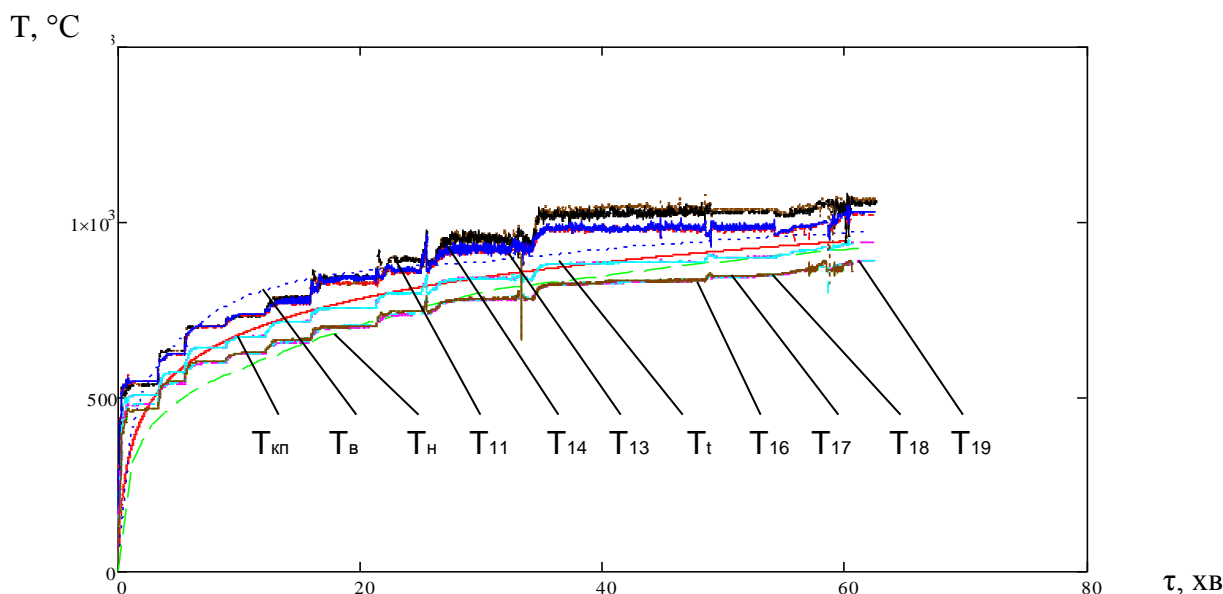


Рисунок 5 – Графік зміни температури у змодельованій печі: $T_{кп}$ - стандартна температурна крива пожежі; $T_в$ - верхня межа випробувань; $T_н$ - нижня межа випробувань; T_t – показники термопарі; T_{11} – температура у середній частині камери печі з правої сторони; T_{13} – температура у середній частині камери печі; T_{14} – температура у середній частині камери печі зліва; T_{16} – температура над пальниками з правої сторони; T_{17} – температура над пальниками у середній частині; T_{18} – температура над пальниками у середній частині; T_{19} – температура над пальниками зліва (рис. 3).

Аналізуючи отримані результати, бачимо, що не всі показники температур, які контролювались у камері увійшли в рамки випробувань. Як можна побачити розкид температур по камері горизонтальної печі є дуже значним і склав близько 186°C. Необхідно відмітити, що температура безпосередньо поруч з термопарою також відрізняється від значень самої термопарі ($\Delta T \approx 3,8^\circ\text{C}$). Що характерно: напроти пальників, за рахунок радіаційного та конвективного теплообміну, поверхня плити прогрівається сильніше. Це пояснюється також розташуванням отворів для відведення продуктів згоряння (рис. 1).

Наступним етапом досліджень був аналіз розподілу температур на обігрівній поверхні залізобетонної плити (рис. 6). Градієнт температур по поверхні плити є значним і це не може не впливати на результати випробувань.

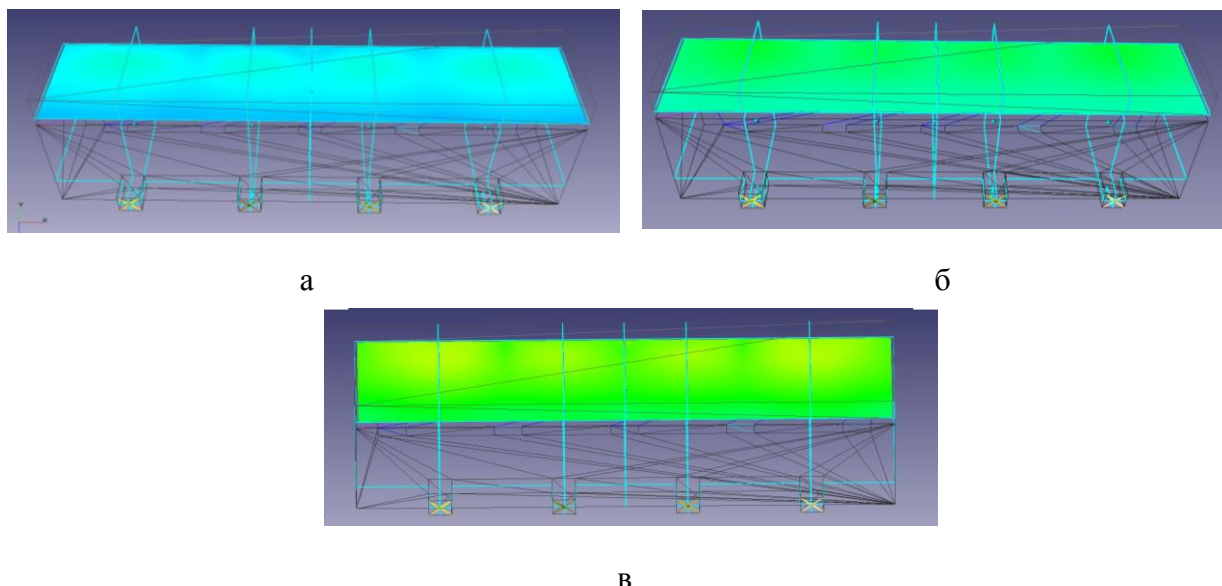


Рисунок 6 – Температурний розподіл на обігрівній поверхні плити: а – 10-та хвилина випробувань; б – 30-та хвилина випробувань; в – 60-та хвилина випробувань.

У табл. 4 наведені результати аналізу параметрів моделювання при їх порівнянні з результатами вогневих випробувань залізобетонної плити.

Таблиця 4 – Параметри відхилень результатів математичного моделювання вогневих випробувань залізобетонної плити від експериментальних даних

№, з/п	Параметр	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Середньоквадр. відхилення, °С	Відносне відхилення, %	Дисперсія адекватності	Дисперсія відтворюваності	Критерій адекватності
1.	Відхилення показників термопар від стандартного температурного режиму пожежі	123	24,5	5,8	5,1	0,037	0,164	0,051
2	Відхилення показників термопар від експериментальних значень	72,7	20,3	3,3	2,9	0,032	0,164	0,038
3.	Відхилення показників термопар від температури в камері в області термопар	56,1	4,3	1,2	0,5	0,011	0,256	0,002
4.	Відхилення середньої температури області печі поблизу плити від показників термопар	67,2	9,3	1,9	0,54	0,018	0,277	0,004
5.	Розкид значень температури по поверхні плити	186	80,2	5,2	29,4	-	-	-

Висновки.

1. Проведено опис моделювання процесу горіння в повномасштабній установці для випробувань на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій.

2. Робота математичної моделі печі при забезпеченні стандартного температурного режиму випробувань є адекватною, оскільки критерій адекватності не перевищує табличного значення критерію Фішера ($0,051 < 1,76$) (табл. 4).

3. Моделювання випробувань показало, що показники термопари є адекватними, і результати випробувань на вогнестійкість можна використовувати як еталонні.

4. Результати показують, що існують значні часові та просторові зміни теплового навантаження, прикладеного до зразка, що змінюється більш, ніж на 30% по площі зразка до кінця дослідження.

5. Таким чином, використання різних модифікацій паливно-форсуночної системи та розміщення приладів метрології мають значний ефект на весь процес тепломасообміну при випробуваннях. Стратегія, стандартного управління роботою печі при використанні середніх температур п'яти термопар [1] для отримання даних про межу вогнестійкості, може не точно відобразити дійсну вогнестійкість конструкцій.

Перспективи подальших досліджень. Провести додаткові дослідження за допомогою математичного моделювання та удосконалити нормативні документи щодо вимог до конструктивних особливостей та метрологічного забезпечення вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги (ISO 834:1975): ДСТУ Б В.1.1-4-98. – [Чинний від 1998-10-28]. – К.: Укрархбудинформ, 1999. – 21с. – (Державний стандарт України).

2. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2002. - [Чинний від 2003-05-01]. - К.: Держпожбезпека, 2003. – 87с. – (Державні будівельні норми).

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

4. Згуря В.І. Удосконалення системи визначення пожежонебезпечних властивостей речовин, матеріалів та будівельних конструкцій / Згуря В.І. автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02 „Пожежна безпека” – Київ, 2007. – 21 с.

5. Нуянзін О.М. Дослідження впливу конструкції вимірювальної арматури вогневих печей на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість / Нуянзін О.М., Поздєєв С.В. // Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля. – 2011. – № 9. – С. 99 – 105.

6. Поздєєв С.В. Метрологічні особливості вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість / Поздєєв С.В., Тищенко О.М., Нуянзін О.М., Нуянзін В.М. // Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля. –2011. – № 8. – С. 73 – 79.

7. Welch S., SOFIE, Simulations of Fires in Enclosures, / Welch S., Rubini P. User Guide. - Cranfield University, 1996.

8. Система моделювання движения жидкости и газа. FlowVision Версия 2.5.4. Руководство пользователя. – Москва: ТЕСИС. – 2008. – 284 с.

9. Осипенко В.І. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур / Осипенко В.І., Поздєєв С.В., Тищенко І.Ю. Навчальний посібник. Черкаси: 2012. – 202 с.