

УДК 614.841.332

О. М. Нуянзін, к. т. н., С. В. Поздєєв, д. т. н., проф., В. М. Нуянзін, к. т. н., С. О. Сідней,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСООБМІНУ У КАМЕРАХ ВОГНЕВИХ ПЕЧЕЙ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ НЕСУЧИХ СТІН

У даній роботі представлено результати математичного моделювання процесу випробування на вогнестійкість несучих стін у різних конфігураціях вогневих печей. Виходячи з отриманих результатів побудовано залежності значень дисперсії температури на поверхні кожної зі змодельованих конструкцій камери печі протягом обчислювального експерименту. Визначено конфігурацію з найбільш рівномірним розподілом температур на обігрівальній поверхні вертикальної конструкції.

Ключові слова: несуча стіна, математичне моделювання, обчислювальна газогідродинаміка (CFD), дисперсія температури.

Постановка проблеми. В умовах пожежі порушення загальної стійкості будівлі завжди відбувається внаслідок руйнування окремих елементів в каркасі споруди. Зважаючи на це, одним із важливих аспектів забезпечення пожежної безпеки у наш час є застосування будівельних конструкцій із гарантованою межею вогнестійкості.

Для визначення фактичних меж вогнестійкості вважається найбільш ефективним метод вогневих випробувань [1, 2]. Тому питання удосконалення та покращення характеристик установок для вогневих випробувань є актуальним і важливим.

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

Аналіз останніх досягнень і публікацій. До вогневих печей висуваються особливі вимоги, які полягають в тому що, нагрівальний факел повинен створюватися на рідкому паливі, полум'я факела не повинне торкатися поверхонь елементів конструкцій, що нагріваються, по об'єму нагрівальної камери повинен бути рівномірний розподіл температури і температура протягом випробування в об'ємі нагрівальної камери повинна мінятися за температурним режимом пожежі, визначеним в стандарті [1]. Внаслідок того, що управління паливною системою не може забезпечити повну відповідність режиму нагріву камери печі стандартному температурному режиму пожежі, існує певна похибка реалізації режиму нагріву елемента [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Відповідно до проведених раніше досліджень [3–5], недосконалість конструкції, метрологічного забезпечення та методів управління паливно-форсуночною системою створюють умови, при яких відбувається нерівномірний розподіл температур на обігрівальній поверхні конструкції.

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

З огляду на це, для проведення досліджень передбачається використання існуючих конструкцій вертикальних вогневих печей і досвіду проектування подібних пристроїв [6] з урахуванням основних вимог [1, 2].

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

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Польові моделі, позначені в зарубіжній літературі аббревіатурою CFD (computational fluid dynamics – англ. обчислювальна гідродинаміка), є більш потужним та універсальним інструментом, ніж зональні та інтегральні, оскільки ґрунтовані на зовсім іншому принципі. Переваги вказаних моделей детально відображено у [3].

На першому етапі роботи було розглянуто 2 конфігурації вогневих печей для випробувань на вогнестійкість несучих стін реально існуючих в Україні лабораторій. На даний момент вони є єдиною альтернативою для перевірки вогнестійкості несучих стін в нашій державі. Геометрична конфігурація печей зображена на рис. 1., а габаритні розміри камер – в табл. 1. Основні принципи побудови математичної моделі, створення сіткової моделі печі показано у [5].

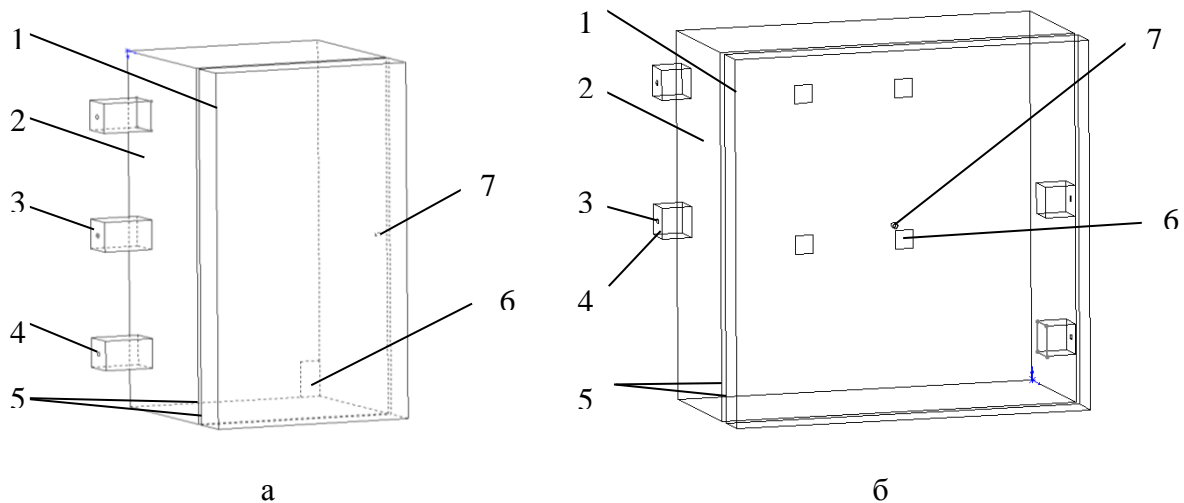


Рисунок 1 – Геометрична конфігурація вертикальних печей (а – Лабораторії 1 (зображено лише симетричну половину) та б – Лабораторії 2): 1 – огороження печі; 2 – фрагмент стіни; 3 – регіон вдуву; 4 – регіон форсунки; 5 – поверхні, що сполучаються; 6 – регіон виходу продуктів горіння; 7 – розрахункова область термопари.

Під час проведення експерименту контроль температури відбувався так, щоб температурний режим нагріву термопари по можливості точно співпадав з стандартною температурною кривою пожежі і не виходив за допустиму похибку 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.

Таблиця 1 – Габаритні розміри установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін

Назва печі	Розміри вогневої камери, мм			Кількість пальників у печі	Джерело
	ширина	висота	глибина		
Випробувальна піч Лабораторії 1	3000	3000	1200	6	[5]
Випробувальна піч Лабораторії 2	3000	3000	1500	4	

Відповідно до проведених обчислювальних експериментів у камерах вогневих печей існує суттєвий перепад температур по вертикалі, менший у горизонтальному напрямку. Це можна пояснити базовими фізичними законами конвективного перенесення тепла [6].

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

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

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

Температура в приарматурному шарі залізобетонних конструкцій вогневих печей на 60-й хвилині досліду була розподілена нерівномірно (табл. 3). Різниця температур дорівнює 31 °С для Лабораторії 1 та 129 °С для Лабораторії 2. Температура 226°С у верхній частині приарматурного шару конструкції, що досліджувалась у Лабораторії 2 була досягнута на 43-й хвилині випробувань, а в середній частині камери – на 53-й.

За допомогою засобів комп'ютерної газодинаміки використаного програмного комплексу було розглянуто розподіл температур на обігрівальній поверхні залізобетонних конструкцій під час випробувань на вогнестійкість. Поверхня стін нерівномірно прогривається протягом усього часу випробувань. Градієнт температур є суттєвим, а це не може не впливати на результати випробувань [5].

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

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

- розподіл температур по поверхні конструкції на 60-й хвилині випробувань [7];
- значення дисперсії температур на поверхні кожної зі змодельованих конструкцій камери печі на кожній хвилині обчислювального експерименту та графік зміни їх у часі;
- графік різниці між максимальною та мінімальною температури на поверхні конструкції протягом усього часу обчислювального експерименту у моделях.

На рис. 1 показано геометричні особливості розглянутих конфігурацій установок для проведення вогневих випробувань.

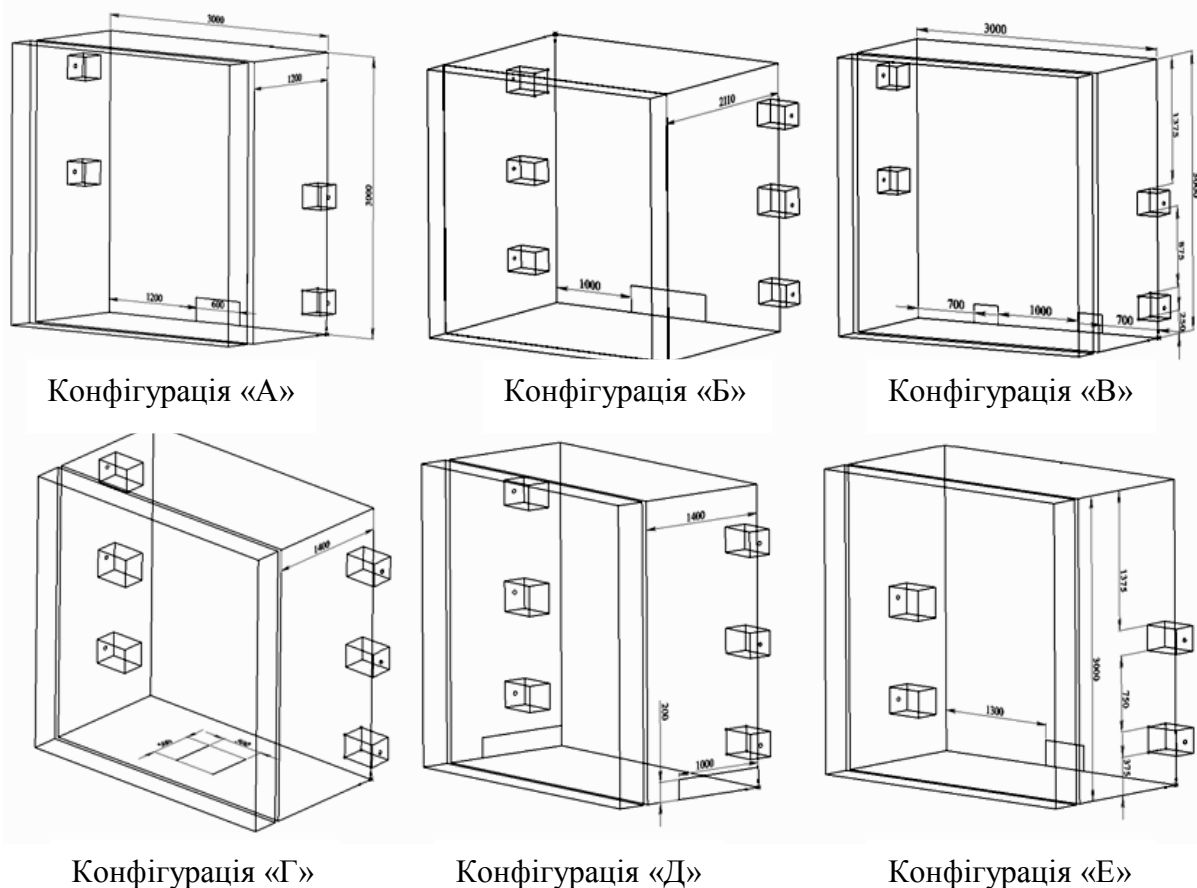


Рисунок 2 – Конфігурації установок для проведення випробувань на вогнестійкість несучих стін.

Конфігурація «А» (рис. 2-а). Змінено розміри, кількість та розташування отворів для відведення продуктів горіння.

У конфігурації «Б» (рис. 2-б). Збільшено кількість пальників; змінено розміри, кількість та розташування отворів для відведення продуктів горіння, збільшено глибину печі у порівнянні з вихідною конфігурацією [3].

Конфігурація «В» (рис. 2-в). Додано додаткові отвори для відведення продуктів горіння, крім того, зменшено розмір отвору відносно початкової конфігурації [3].

Для більш рівномірного розподілу температур по вертикалі було створено конфігурацію «Г» (рис. 2-г). У якій отвір для відведення продуктів горіння знаходиться у дні печі.

Конфігурація «Д» (рис. 2-д). Змінено розміщення отворів для відведення продуктів горіння, додано додаткові пальники, які знаходяться на одному рівні з іншими пальниками.

Конфігурація «Е» (рис. 2-е). Змінено розміщення отворів для відведення продуктів горіння, змінено розміщення пальників.

На рис. 3 показано розподіл температур по поверхні конструкції у кожній з конфігурацій на 60-й хвилині випробувань.

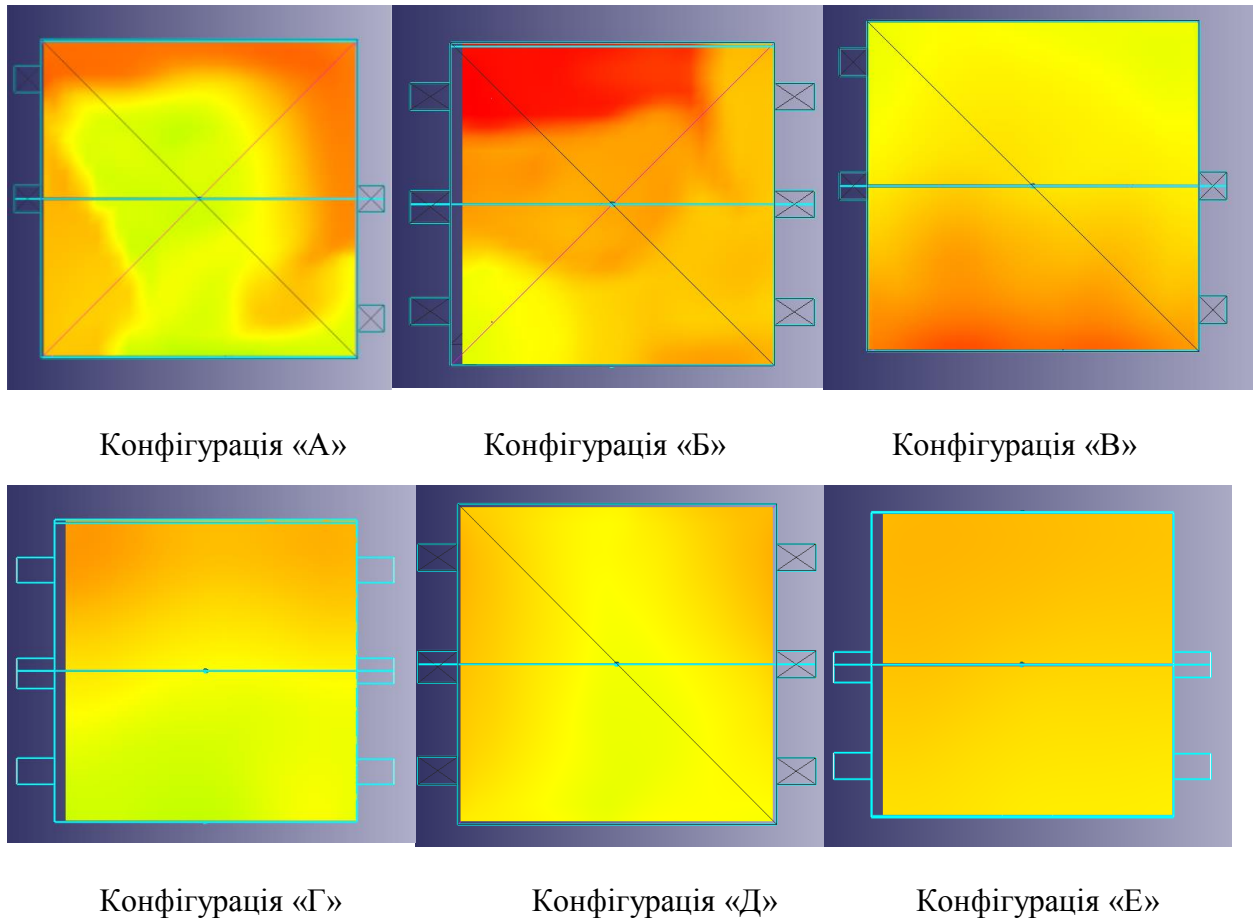


Рисунок 3 – Градієнт температур по обігрівальній поверхні змодельованих конструкцій.

На наш погляд основними недоліками конфігурації «А» (рис. 2-а, рис. 3-а) є, порівняно з іншими конфігураціями, невеликий об'єм камери печі, недосконале розташування отворів для відведення продуктів горіння. За рахунок цього, залізобетонна конструкція прогривається нерівномірно. Конструкція прогривається слабше у середній частині камери печі та над отворами для відведення продуктів горіння.

Змінивши конструкцію внутрішнього простору камери установки (рис. 2-б) температура ще менш рівномірно розподілилось по обігрівальній поверхні плити (рис. 3-б). Проте, відбувся більш характерний розподіл температур по вертикалі.

У конфігурації «В» (рис. 2-в) було отримано більш рівномірне розподілення температур (рис. 3-в) у порівнянні з конфігураціями «А» та «Б», але через розміщення отворів для відведення продуктів горіння ближче до пальників, але конвективно потоки також були направлені у бік означених отворів і більша температура спостерігалась у цій області.

Як видно з рис. 3-г отвір у середній частині дна печі привів до більшої рівномірності прогріву конструкції, в порівнянні з конфігурацією «В». Тому, дослідження роботи конфігурацій вирішено було продовжити.

Наступними у нашому дослідженні розподілу температур стали конфігурації «Е» (рис. 2-е) та «Д» (рис. 2-ж). Переваги конфігурації «Е» у тому, що нагрів відбувається за допомогою 4-х пальників, але їх розміщення змінене, у порівнянні з вихідною конфігурацією (рис. 2 – рис. 3).

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

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

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

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

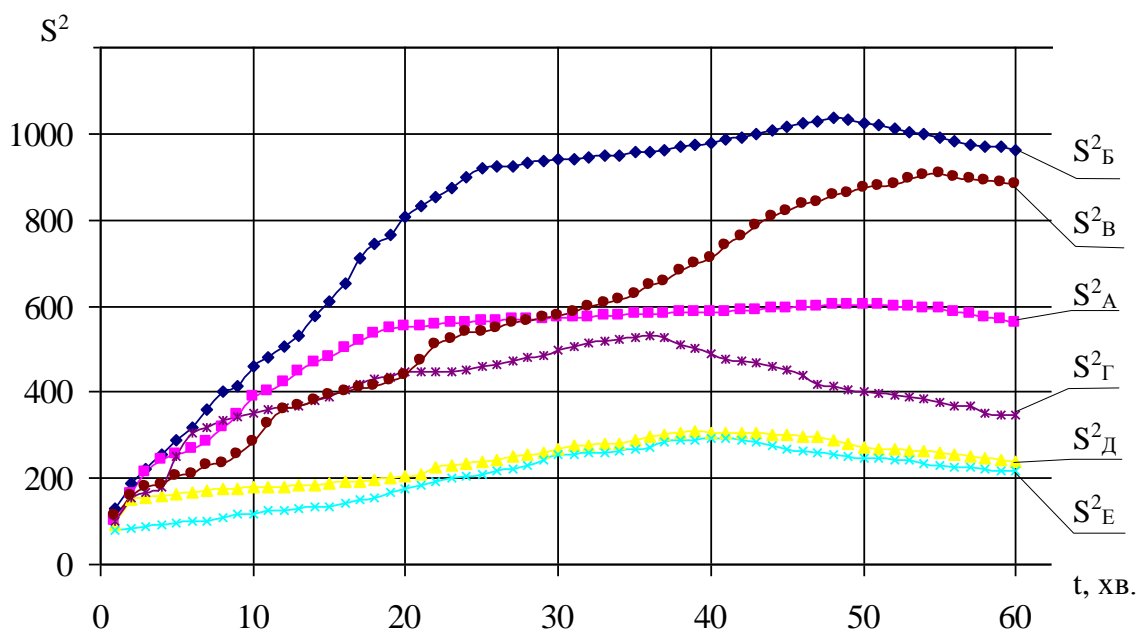


Рисунок 4 – Дисперсія температур по обігрівальній поверхні несучої стіни під час обчислювального експерименту.

У отриманих графіках існує певна особливість: у більшості кривих, які відображають числове значення дисперсії температур, існує екстремум. Після початкової фази, зростання значення дисперсії, вона поступово починає зменшуватись. Це можна пояснити, якщо розглянути стандартну температурну криву пожежі [1]. Більш інтенсивна зміна температури в камері вогневої печі на початкових хвилинах випробувань і поступове зменшення різниці граничних значень максимуму і мінімуму. Тому, ми обмежили дослідження 60-тою хвилиною розрахунку (рис. 4).

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

Якщо детально розглянути створені конфігурації, то найменші значення дисперсій на усьому часовому проміжку спостерігаються у конфігураціях «Е» та «Д». Найбільше значення дисперсії у конфігурації «Е» спостерігається на 40-й хвилині випробувань, у конфігурації

«Д» на 41-й хвилині. В цей же час, у конфігураціях «А» та «Б» максимальне значення дисперсії було досягнуто майже на 60-й хвилині.

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

Виходячи з отриманих даних, можемо зробити висновки.

Висновки. У даній роботі показано результати чисельного моделювання ряду комп'ютерних конфігурацій установки для випробування несучих стін. Виходячи з отриманих кривих значень дисперсії температури на поверхні кожної зі змодельованих конструкцій камери печі на кожній хвилині обчислювального експерименту (рис. 5) визначено конфігурацію з найбільш рівномірним розподілом температур на обігрівальній поверхні несучої стіни, що дозволяє зменшити похибку, яка виникає за рахунок нерівномірності розподілу температур на обігрівальній поверхні конструкцій під час 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. Аналіз існуючих математичних моделей тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін / Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Сідней С. О. [та ін.] // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2015. – № 18. – С. 91 – 100.
4. Влияние дисперсии температур на обогреваемых поверхностях горизонтальных железобетонных строительных конструкций на значение их предела огнестойкости во время испытаний этих конструкций в огневых печах / Нуянзін О. М., Сідней С. О., Поздєєв С.В. // Чрезвычайные ситуации: образование и наука : международный научно-практический журнал. – Гомель : ГИИ, МЧС РБ 2015. – , Том 15, № 1. С. 158 – 164.
5. Вплив конструктивних особливостей вогневих печей на достовірність результатів випробувань стін на вогнестійкість / Сідней С. О., Нуянзін О. М., Поздєєв С.В.// Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки : зб. наук. праць. – Київ : УкрНДІЦЗ, 2015. – № 1 (31). – С. 4–12.
6. Зобнин Б. Ф. Нагревательные печи. Теория и расчет / Б. Ф. Зобнин. – М. : Машиностроение, 1964. – 312 с.
7. Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision Версия 2.5.4. Руководство пользователя. – Москва: ТЕСИС. – 2008. – 284 с.