УДК 614.841.332

О. М. Нуянзін, канд. техн. наук, С. В. Поздєєв, д-р техн. наук, проф., С. О. Сідней

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВОГНЕВИХ ПЕЧЕЙ НА ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ СТІН НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

У роботі показано основні принципи побудови математичної моделі вогневої печі для випробувань стін на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою програмного комплексу CFD FlowVision 2.5. Проведено обчислювальні експерименти у створених моделях. Виділено особливості, які можуть впливати на достовірність результатів вогневих випробувань несучих стін.

Ключові слова: метрологічні характеристики, випробування на вогнестійкість, обчислювальний експеримент, вогнева піч, математичне моделювання.

O. Nuyanzin, Cand. of Sc. (Eng.), S. Pozdeyev, Doc. of Sc. (Eng.), Prof., S. Sidney

DESIGN FEATURES INFLUENCE OF FIRE STOVES ON THE RELIABILITY OF TEST RESULTS WALLS ON FIRE RESISTANCE

We show the basic principles of firing stoves mathematical modeling for walls testing based on full system of Navier-Stokes equations using program complex CFD FlowVision 2.5. A computational experiments in established models. Highlighted features that may affect the reliability of the bearing walls fire tests results.

Keywords: metrological characteristics, fire resistance test, computational experiment, firing stove, mathematical modeling.

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, протягом якої несуча здатність, теплоізоляційна спроможність і цілісність елемента не порушаться. 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.

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].

Стандартні методи вогневих випробувань достатньо добре вивчені і їм присвячено багато робіт де висвітлені основні аспекти вогневих випробувань на вогнестійкість вертикальних конструкцій, але в даних роботах недостатня увага приділяється вивченню метрологічних характеристик випробувальних установок та впливу конструктивних особливостей цих установок на достовірність отриманих результатів.

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 [3, 4]. Якщо йдеться про час, що

визначає настання граничного стану, який визначається тією чи іншою лабораторією, то немає гарантій, що це не може бути дуже завищений результат.

Створити математичні моделі реальних вогневих випробувальних вертикальних печей на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса. Відповідно до результатів проведених обчислювальних експериментів зробити висновки щодо показників температури у камері печі. Виділити особливості, які можуть впливати на достовірність результатів вогневих випробувань стін.

Було розглянуто 2 конфігурації вогневих печей для випробувань на вогнестійкість несучих стін існуючих в Україні лабораторій. Умовно назвемо їх Лабораторії 1 та Лабораторії 2. 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.

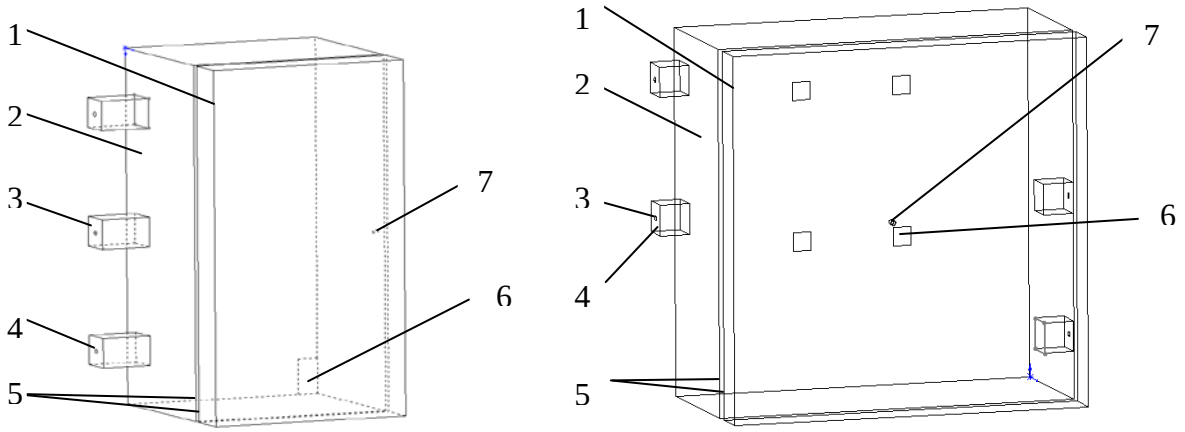


Рисунок 1 – Геометрична конфігурація вертикальних печей (а – Лабораторії 1 (зображено лише симетричну половину) та б – Лабораторії 2): 1 – огородження печі; 2 – фрагмент стіни; 3 – регіон вдуву; 4 – регіон форсунки; 5 – поверхні, що сполучаються; 6 – регіон виходу продуктів горіння; 7 – розрахункова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

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	

До основних принципів побудови математичної моделі належать такі:

1) як основний інструмент побудови моделі та проведення чисельного експерименту використано програмний комплекс «FlowVision 2.5»;

2) у процесі чисельного експерименту враховано конвективний і радіаційний теплообмін поверхні випробуваних конструкцій та простору камери печі;

3) у камерах передбачена модель термопари у вигляді стержня довжиною 100 мм і діаметром 6 мм з урахуванням конвективного та радіаційного теплообміну;

4) використано симетричну половину вогневої печі Лабораторії 1, що збільшує продуктивність розрахунку.

Після створення геометричних моделей їх імпортують до середовища програмного комплексу «FlowVision».

Після введення параметрів математичної моделі підобласть камери печі сполучається з конструкцією та термопарою. Крім того, уводять загальні параметри, такі як: вісь гравітації, критерій Куранта – Фрідріхса – Леві [6] тощо.

Наступний етап полягав у створенні сіткової моделі печі. Метод контрольних об'ємів, що застосований у програмному комплексі, має певні особливості.

Чисельне інтегрування рівнянь за просторовими координатами проводять із використанням прямокутної, адаптивної, локально подрібненої сітки. Такий підхід уможливлює, з одного боку, використання простої рівномірної неадаптивної сітки під час виконання завдань із порівняно нескладною геометрією. З іншого боку, з'являється змога в процесі розв'язування задач зі складною геометрією проводити адаптацію підлаштування сітки до особливостей геометрії поблизу граничних умов, а в ході розв'язування задач із розривними течіями – адаптацію за значеннями аналізованих функцій, їхніх градієнтів та ін.

Процедура локального подрібнення сітки в області адаптації передбачає послідовний розподіл: із вихідної, кожної попередньої комірки на 4 більші дрібні осередки (у тривимірному випадку на 8) до виконання умови адаптації (наприклад, досягнення заданої точності обчислення градієнта аналізованої функції).

Між точністю розрахунку й кількістю розрахункових комірок існує прямо пропорційна залежність, а між кількістю комірок і часом, за який буде проведений розрахунок, – обернено пропорційна. Тому потрібно обрати баланс між необхідною точністю розрахунку та часом, який буде витрачений на проведення розрахунку.

Для врахування конвективного та радіаційного теплообміну між поверхнею термопари і простором камери печі, адаптивну сітку для термопари значно подрібнено (рис. 2-г та рис. 3-г). Для цього створено адаптацію в місці розташування термопари.

Для врахування особливості, яка полягає в наявності моделі термопари, створена двоступінчата адаптація спочатку 1 рівня по простору циліндра, що охоплює термопару радіусом 0.01 м і заввишки 0.12 м та 1 рівня по простору підобласті термопари.

Сутність проведення чисельного експерименту полягає в ініціації процесу горіння з контролем температури в середині моделі термопари так, щоб температурний режим її нагріву по можливості точно співпадав з стандартною температурною кривою пожежі [1]. Для цього засобами контролю системи FlowVision в інтерактивному режимі знімаються поточні дані з термопари, і, при досягненні максимальної температури для певного кроку за часом параметри процесу горіння змінюються. Потім процедура зміни параметрів процесу горіння повторюється для наступного часового інтервалу. При цьому фіксуються дані про температуру поверхні, арматурного шару і середини залізобетонного виробу для даного інтервалу.

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 термопари візуалізується і контролюється порівнянням для часового кроку випробувань.

3. При досягненні температури термопари відповідної температури стандартного температурного режиму пожежі для даного інтервалу параметри процесу горіння змінюються.

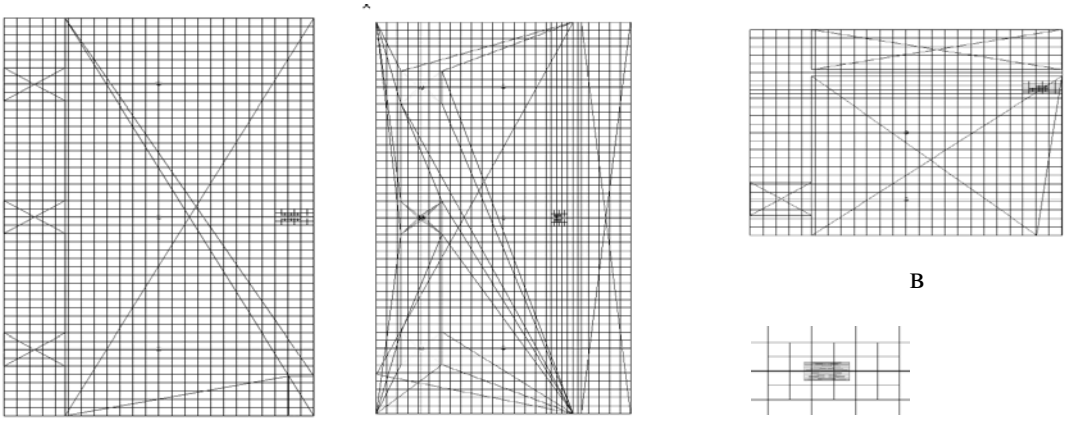
4. Після вигоряння всіх частинок палива (визначається по температурі факелів) встановлюється ще більш грубий крок до настання наступного тимчасового інтервалу.

5. Для наступного часового інтервалу розрахункові процедури повторюються.

6. При проведенні розрахунку контролюється температура відповідних точок стіни і простору печі.

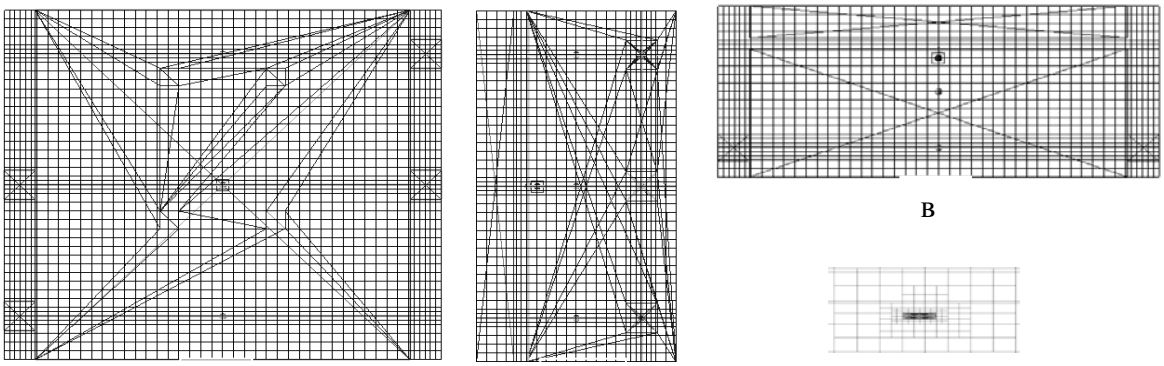
З цією метою було побудовано сіткову модель простору вертикальної печі (рис. 2 та рис. 3).

Для того, щоб врахувати конвективний і радіаційний теплообмін поверхні термопари і простору камери печі, адаптивну сітку для термопари було значно подрібнено (рис. 2).



а б в г

Рисунок 2 – Сіткова модель простору вертикальної печі Лабораторії 1 (показано лише симетричну половину): а – вид по осі У; б – вид по осі X; в – вид по осі Z; г – адаптивна сітка для термопари (вид на бокову поверхню термопари).



а б в г

Рисунок 3 – Сіткова модель простору вертикальної печі Лабораторії 2: а – вид по осі У; б – вид по осі X; в – вид по осі Z; г – адаптивна сітка для термопари (вид на бокову поверхню термопари).

Результати обчислювального експерименту. 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 допустимі відхилення [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. Дані щодо температури у місцях вказаних на рис. 4 та рис. 5 фіксувалися щосекунди для досягнення необхідної точності при побудові графіків.

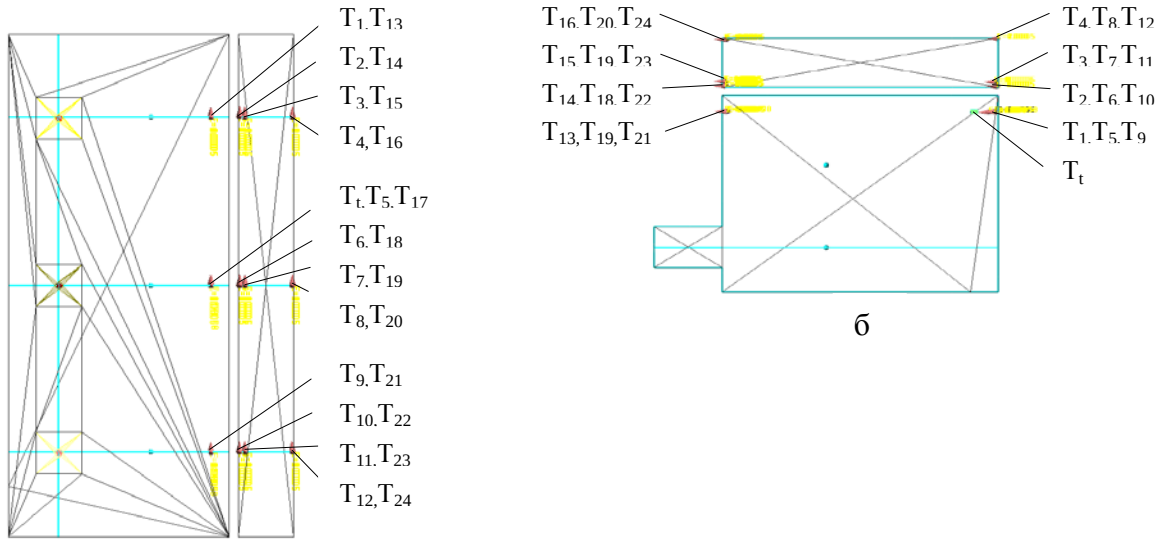


Рисунок 4 – Місця де відбувався контроль температури при моделюванні печі Лабораторії 1 (показано лише симетричну половину): T_t, T_1-T_{24} – місця де відбувалося зняття температури; а – вид по осі X; б – вид по осі Z;.

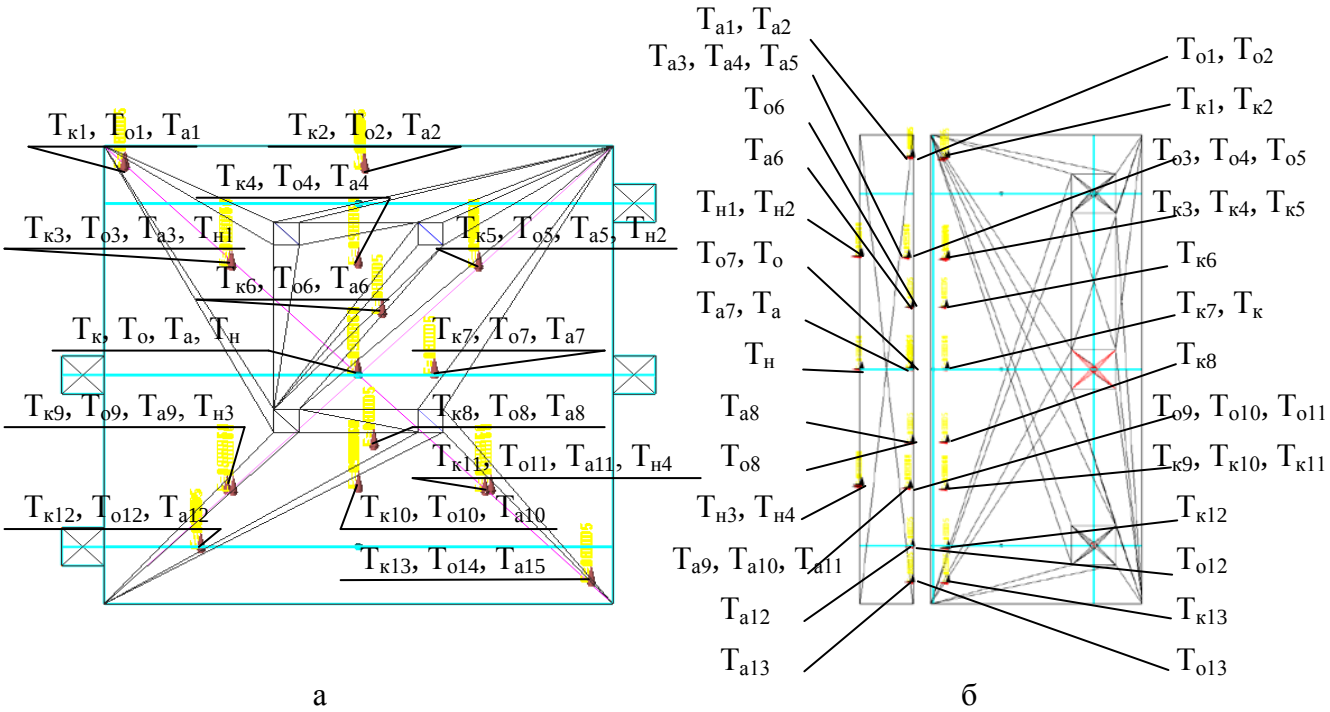


Рисунок 5 – Місця де відбувався контроль температури при моделюванні печі Лабораторії 2: $T_а$, $T_к$, $T_н$,$T_о$ – місця де відбувалося зняття температури; а – вид по осі У; б – вид по осі Z;.

На рис. 6 – рис. 8 показано графіки, що отримані за результатами обчислювального експерименту.

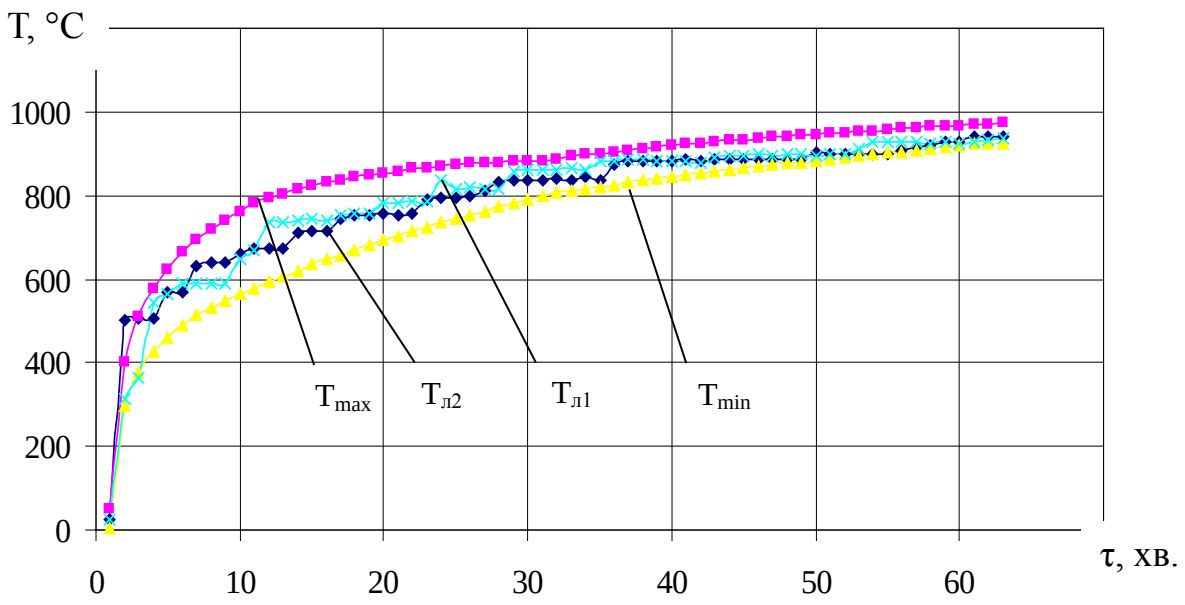


Рисунок 6 – Графік зміни температури всередині змодельованої термопари в камерах вертикальних вогневих печей: $T_{л1}$ – показники всередині змодельованої термопари в камері печі Лабораторії 1 (рис. 1, рис. 2, рис. 4); $T_{л2}$ – показники всередині змодельованої термопари в камері печі Лабораторії 2 (рис. 1, рис. 3, рис. 5); T_{max} – допустиме максимальне значення середньої температури в печі; T_{min} – допустиме мінімальне значення середньої температури в печі.

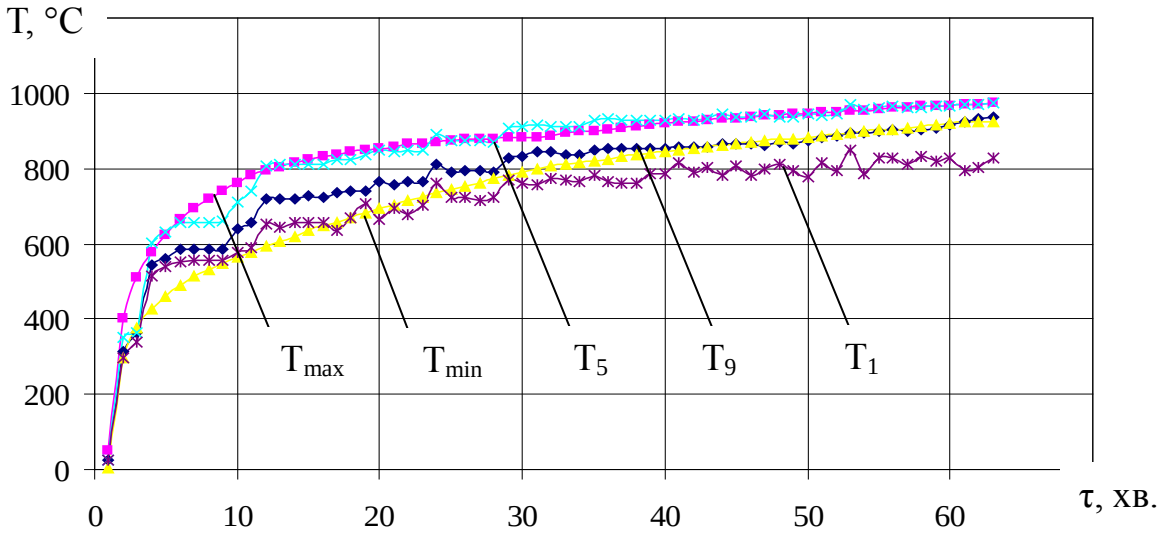


Рисунок 7 – Графік зміни температури в різних місцях камери вертикальної печі Лабораторії 1: T_{max} – допустиме максимальне значення середньої температури в печі; T_{min} – допустиме мінімальне значення середньої температури в печі; T_5 – показники температури у верхній частині печі; T_9 – показники температури в середній частині печі; T_1 – показники температури в нижній частині печі (рис. 4).

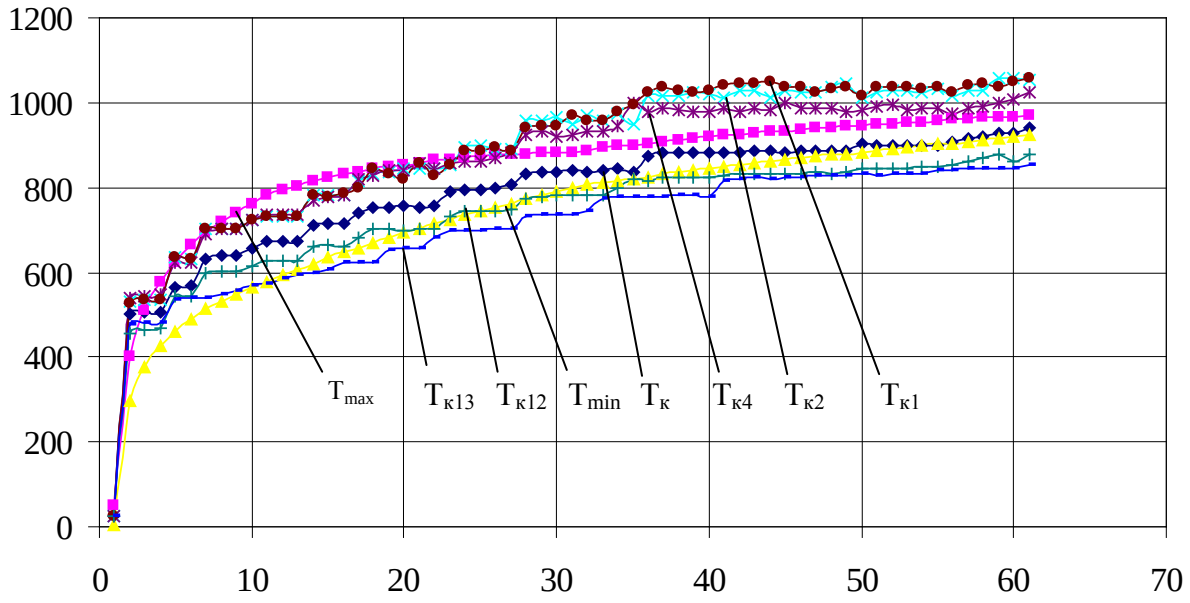


Рисунок 8 – Графік зміни температури в різних місцях камери вертикальної печі Лабораторії 2: T_{max} – допустиме максимальне значення середньої температури в печі; T_{min} – допустиме мінімальне значення середньої температури в печі; $T_{к1}$, $T_{к2}$ – показники температури у верхній частині печі; $T_к$, $T_{к4}$ – показники температури в середній частині печі; $T_{к12}$, $T_{к13}$ – показники температури в нижній частині печі (рис. 5).

Стандартна температурна крива пожежі [1] на 60-й хвилині становить температуру 945 ºС. При цьому відхилення складає: від 922 ºС до 960 ºС. Середня температура в камерах змодельованих установок перебуває в обов'язкових межах, як і температура термопари (рис. 6).

У камері вогневих печей існує суттєвий перепад температур по вертикалі, менший у горизонтальному напрямку (рис. 7, рис. 8). Це можна пояснити базовими фізичними законами конвективного перенесення тепла [7].

Таблиця 2 – Температура (на відстані 100 мм від стіни) за результатами обчислювальних експериментів у різних місцях камер вертикальних випробувальних печей

Розміщення контрольної точка	Відповідно до [1].	Лабораторія 1	Лабораторія 2
На 60-й хвилині випробувань:			
Всередині змодельованої термопари	від 922 °С до 969 °С	≈ 937 °С	≈ 942 °С
Безпосередньо поруч з термопарами		≈ 924 °С	≈ 928 °С
У верхній частині камер печей		≈ 968 °С	≈ 1057 °С
У нижній частині камер печей		≈ 828 °С	≈ 851 °С
На 30-й хвилині випробувань:			
Всередині змодельованої термопари	від 800 °С до 884 °С	≈ 860 °С	≈ 837 °С
Безпосередньо поруч з термопарами		≈ 844 °С	≈ 839 °С
У верхній частині камер		≈ 914 °С	≈ 968 °С
У нижній частині камер		≈ 757 °С	≈ 735 °С

Отримані результати моделювання випробувань вертикальних будівельних конструкцій засвідчують, що не всі показники температур, контрольовані в камері, не перевищили

допустиме відхилення. Різниця температур наприкінці розрахунку в різних частинах камери печі становить 140 ºС для Лабораторії 1 та 156 ºС для Лабораторії 2 (табл. 2). Необхідно зазначити, що температура 945 ºС у верхній частині камери печі Лабораторії 2 була досягнута вже на 40-й хвилині випробувань.

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

У камерах печей температура безпосередньо поряд із термопарою відрізняється від значень термопари ($\Delta T_{л1} \approx 13°C$, $\Delta T_{л2} \approx 14°C$) (табл. 2). Отже, якщо врахувати похибку термопари (а це ≤ 15°С [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 ºС для Лабораторії 1 та 129 ºС для Лабораторії 2. Температура 226ºС 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.

Таблиця 3 – Температура (на рівні арматури) за результатами обчислювальних експериментів у різних місцях камер вертикальних випробувальних печей

Розміщення контрольної точка	Відповідно до [8]	Лабораторія 1	Лабораторія 2
На 60-й хвилині випробувань:			
Безпосередньо поруч з термопарами	<500 ºС	≈ 285 ºС	≈ 283 ºС
У верхній частині камер		≈ 284 ºС	≈ 297 ºС
У нижній частині камер		≈ 253 ºС	≈ 226 ºС
На 30-й хвилині випробувань:			
Безпосередньо поруч з термопарами	<500 ºС	≈ 165 ºС	≈ 184 ºС
У верхній частині камер		≈ 149 ºС	≈ 185 ºС
У нижній частині камер		≈ 193 ºС	≈ 151 ºС

За допомогою використаного програмного комплексу було визначено розподіл температур на обігрівальній поверхні залізобетонних конструкцій під час випробувань на вогнестійкість. Поверхня стін нерівномірно прогрівається протягом усього часу випробувань. Градієнт температур є суттєвим, а це не може не впливати на результати випробувань.

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.

З огляду на проведенні дослідження можна зробити такі висновки.

Висновки.

1. Створено математичні моделі вертикальних печей для випробувань стін на вогнестійкість на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою програмного комплексу CFD FlowVision 2.5.

2. Відповідно до проведених дослідів показники температури поруч з термопарою відрізняються від показників самої термопари. Для Лабораторії 1 $\Delta T \approx 12{,}8$ °C, а для Лабораторії 2 – 14,1 °C. Отже, якщо врахувати похибку термопари (а це ≤15°C [1]), то сумарна похибка може становити ≈ 27 – 30 °C. Оскільки випробування проходять протягом тривалого часу, це позначається на достовірності й точності отриманих результатів.

3. За результатами обчислювальних експериментів, температура у камері вогневих печей розподіляється нерівномірно. У верхній частині камери печі перевищує допустиме відхилення, а в нижній необхідна температура у потрібний проміжок часу не досягається. Різниця температур на 60-й хвилині складає 140,4°C та 205,6 °C для Лабораторій 1 і 2 відповідно.

4. Вказані особливості можуть впливати на достовірність результатів випробувань несучих стін.

Перспективи подальших досліджень.

1. Необхідно отримати кількісні показники щодо адекватності побудованих математичних моделей для з'ясування того, наскільки коректно вони описують реальні процеси, що відбуваються в системі і наскільки якісно вони прогнозують розвиток аналізованих процесів.

2. Провести додаткові досліди 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. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В. 1.1-4-98. [Чинний від 1998-10-28.] – К. : Укрархбудінформ, 2005. – 20 с. – (Національний стандарт України).
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. Згуря В.І. Удосконалення системи визначення пожежонебезпечних властивостей речовин, матеріалів та будівельних конструкцій : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02 „Пожежна безпека" / Згуря В.І. – Київ, 2007. – 21 с.
4. Нуянзін О. М. 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 Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля № 18 2014 рік. Серія КВ № 13745-2719.
5. Новак С. В. Методи випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість / С. В. Новак, Л. М. Нефедченко, О. О. Абрамов. – К. : Пожінформтехніка, 2010. – 132 с.
6. Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision Версия 2.5.4. Руководство пользователя. – Москва: ТЕСИС. – 2008. – 284 с.
7. Зобнин Б. Ф. Нагревательные печи. Теория и расчет / Б. Ф. Зобнин. – М. : Машиностроение, 1964. – 312 с.
8. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1-2 : General rules – Structural fire design, Brussels 2004.