

Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Національний університет цивільного захисту України
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

**А. В. Перегін, В. М. Гвоздь,
М. А. Кришталь, Н. Я. Калашник, О. М. Нуянзін**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
МАЛОГАБАРИТНОЇ ВОГНЕВОЇ
УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ
ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

МОНОГРАФІЯ

Черкаси 2023

УДК 614.841.45

О 13

*Рекомендовано до друку вченою радою
Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
НУЦЗ України
(протокол № 3 від 29 листопада 2023 р.)*

Обґрунтування параметрів малогабаритної вогневої установки для оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій / А. В. Перегін, В. М. Гвоздь, М. А. Кришталь, Н. Я. Калашник, О. М. Нуянзін – Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. – 168 с.

Рецензенти:

Костенко В. К. - доктор технічних наук, професор;

Сідней С. О. - кандидат технічних наук, доцент.

Проаналізовано нормативні документи, які регламентують вимоги з оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін та актуальні наукові праці з метою встановлення шляхів удосконалення експериментально-розрахункового методу. Створено та науково - обґрунтовано комп'ютерні моделі малогабаритної вогневої випробувальної печі для описування процесу тепломасообміну у ній. У результаті визначено шляхи удосконалення конструкції та конфігурації малогабаритної вогневої установки.

Відповідно до виконаного математичного моделювання створено реальну малогабаритну вогневу установку, виконано експериментальні дослідження теплового впливу пожежі на несучу залізобетонну стіну та перевірено адекватність отриманих результатів. На основі отриманих результатів виконано розрахунок напружено-деформованого стану несучої залізобетонної стіни та обґрунтовано алгоритм виконання цього розрахунку.

За отриманими результатами розроблено та отримано удосконалену експериментально-розрахункову методику оцінювання межі вогнестійкості елементів будівельних конструкцій на основі випробування їхніх фрагментів у малогабаритних вогневих печах та виконання подальшого розрахунку міцності. Таку методику доцільно використовувати під час викладання навчальних дисциплін, що передбачають вивчення поведінки будівельних конструкцій під час пожежі для курсантів, студентів, аспірантів (ад'юнктів), які володіють відповідним математичним апаратом у межах навчальної програми закладу вищої освіти III-IV рівня акредитації.

© ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023

ЗМІСТ

| | |
|--|-----------|
| ВСТУП..... | 7 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АКТУАЛЬНИХ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ТА ВИМОГ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ З ОЦІНЮВАННЯ МЕЖИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ | 8 |
| 1.1. Нормування вогнестійкості несучих залізобетонних стін | 8 |
| 1.2. Особливості методу натурних випробувань несучих залізобетонних будівельних конструкцій | 12 |
| 1.3. Особливості методу вогневих випробувань у печах несучих залізобетонних будівельних конструкцій | 17 |
| 1.4. Особливості розрахункових методів оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій | 28 |
| 1.5. Особливості експериментально-розрахункових методів оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій..... | 37 |
| РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ МАЛОГАБАРИТНОЇ ВОГНЕВОЇ УСТАНОВКИ..... | 40 |
| 2.1. Застосування математичних моделей на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса для описування процесів, що відбуваються в камері вогневої печі..... | 40 |
| 2.2. Аналіз основних характеристик програмних комплексів обчислювальної газогідродинаміки | 45 |
| 2.3. Особливості комп'ютерних моделей тепломасообміну у вогневих печах під час виконання випробування з нагрівання несучих залізобетонних будівельних конструкцій | 47 |
| 2.4. Розроблення моделі малогабаритної вогневої установки та перевірка якості її роботи за допомогою програмного комплексу FDS | 52 |

| | |
|--|------------|
| 2.5. Розроблення моделі малогабаритної вогневої установки та перевірка якості її роботи за допомогою програмного комплексу FlowVision..... | 60 |
| 2.6. Розроблення концепту удосконаленої малогабаритної вогневої установки та описування її можливих параметрів..... | 71 |
| РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З НАГРІВАННЯ ФРАГМЕНТІВ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ..... | 83 |
| 3.1. Експериментальне обладнання та процес створення малогабаритної вогневої установки | 83 |
| 3.2. Методика виготовлення та формування малогабаритних фрагментів несучих залізобетонних стін для випробування | 93 |
| 3.3. Методика виконання експериментального дослідження з нагрівання фрагмента несучої залізобетонної стіни у малогабаритній вогневій установці | 98 |
| 3.4. Процес виконання експериментального дослідження з нагрівання фрагментів несучих залізобетонних стін та його результати..... | 101 |
| 3.5. Перевіряння адекватності результатів виконання експериментального дослідження | 108 |
| РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ЧАСТИНИ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ..... | 111 |
| 4.1. Методика відновлення температурних розподілень у перерізі стінових елементів за точковими замірами | 111 |
| 4.2. Відновлення температурних полів за результатами експериментальних досліджень | 119 |

| | |
|--|------------|
| 4.3. Результати використання запропонованого методу..... | 124 |
| 4.4. Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін | 129 |
| РОЗДІЛ 5. АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ У МАЛОГАБАРИТНІЙ ВОГНЕВІЙ УСТАНОВЦІ..... | 132 |
| 5.1. Загальний опис удосконаленої експериментально-розрахункової методики оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій | 132 |
| 5.2. Вимоги щодо малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на залізобетонні будівельні конструкції | 133 |
| 5.3. Вимоги щодо створення фрагментів залізобетонних несучих конструкцій для виконання експериментальної частини удосконаленої методики оцінювання межі вогнестійкості | 136 |
| 5.4. Алгоритм виконання експериментального дослідження з нагрівання на прикладі несучої залізобетонної стіни за стандартним температурним режимом пожежі..... | 139 |
| 5.5. Необхідний результат експериментального дослідження для оцінювання межі вогнестійкості на прикладі несучих залізобетонних стін | 140 |
| РОЗДІЛ 6. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ, ВИКОНАНИХ У МАЛОГАБАРИТНІЙ ВОГНЕВІЙ УСТАНОВЦІ..... | 142 |
| 6.1. Методика відновлення температурних полів | 142 |
| 6.2. Розрахунок міцності бетону на прикладі фрагмента несучої залізобетонної стіни на основі теплових значень за удосконаленою методикою..... | 144 |

| | |
|--|-----|
| 6.3. Аналіз точності результатів оцінювання межі вогнестійкості на прикладі несучих стін за удосконаленим експериментально-розрахунковим методом | 145 |
| 6.4. Схема використання експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих будівельних конструкцій | 148 |
| ВИСНОВКИ | 153 |

ВСТУП

Від вогнестійкості та тривалості теплового впливу пожежі на огороджувальні конструкції залежить ризик високих соціально-економічних втрат за рахунок обмеження поширення пожежі, а саме створення протипожежних перешкод, гарантування під час пожежі безпеки евакуації людей та майна з приміщень будівель. На відміну від збереження будівельних конструкцій незалежно від економічних міркувань безпека людей має бути гарантована у всіх випадках, оскільки людина може отримати механічні травми, опинитися під уламками завалених будівельних конструкцій, або можуть просто бути зруйновані шляхи евакуації. Для гарантування пожежної безпеки в наш час одним з найважливіших аспектів є застосування, зокрема огороджувальних конструкцій з гарантованою межею вогнестійкості.

Одним із найбільш поширених методів оцінювання межі вогнестійкості для огороджувальних елементів будівельних конструкцій є експериментальний метод, а саме випробування в печах. Його особливістю є те, що великогабаритні печі дають достатньо достовірні результати. Але водночас не потрібно забувати масштаби нашої країни: якщо елемент будівельної конструкції виготовляють, наприклад, в Одесі, то транспортування в інший регіон з метою оцінювання межі вогнестійкості є, як мінімум, нераціональним. У таких випадках можливо застосувати розрахункові методи, але вони обмежені загальними характеристиками матеріалу і не враховують особливостей багатокомпонентних складників, а також в'язкі сполуки можуть бути використані різні і тому, як наслідок, відмінності у межі вогнестійкості таких конструкцій можуть відрізнятись на 10-ки хвилин. Тож метод оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних несучих стін має враховувати всі деталі з огляду на вищезазначені обставини.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АКТУАЛЬНИХ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ТА ВИМОГ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ З ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Нормування вогнестійкості несучих залізобетонних стін

Несуча стіна – це стіна, яка сприймає навантаження опор перекриттів даху, верхніх поверхів та передає його фундаменту. Тобто вона сконструйована так, щоб утримувати навантаження, що було прикладене, а також є огорожувальним елементом будівельних конструкцій, які виконують несучу функцію, сприймаючи водночас основне навантаження у будівлі.

Згідно з [1] межа вогнестійкості – це показник вогнестійкості конструкції, тобто інтервал часу в хвилинах від початку впливу вогню до виникнення одного із граничних станів елементів та конструкцій.

Для несучих стін характерне настання трьох граничних станів. Одним із граничних станів є втрата несучої здатності, яку визначають за величиною критичного поздовжнього зміщення та швидкості його наростання.

Граничне значення поздовжнього переміщення навантаженого кінця зразка визначають за формулою у міліметрах [1, 2]:

$$C = h/100, \quad (1.1)$$

граничне значення швидкості наростання вертикальних деформацій

$$\frac{dC}{dt} = 3 \cdot 10^{-3} h, \quad (1.2)$$

де h – початкова висота зразка, мм.

Граничний стан за ознакою втрати теплоізолювальної здатності [1, 2] є підвищення температури у приміщенні, суміжному приміщенню із пожежею, тобто на необігрівальній поверхні перевищення середньої температури досліджуваного зразка над початковою середньою температурою цієї поверхні на 140 °С або перевищення температури необігрівальної поверхні досліджуваного зразка в довільній точці над початковою температурою в цій точці на 180 °С.

Граничний стан за ознакою втрати цілісності зокрема несучих стін визначається наявністю наскрізних тріщин у стіні або ушкоджень, які є каналами для проникнення продуктів горіння у суміжне приміщення [1, 2].

Останнім часом нормування вогнестійкості будівельних конструкцій зазнає реформування у напрямку відповідності нормам, що є чинними у державах Євросоюзу. Основним показником вогнестійкості несучих стін є межі вогнестійкості, які визначають часом (в хвилинах) від початку пожежі до настання втрати несучої здатності (R), теплоізолювальної здатності (I) та цілісності (E), оскільки стіни виконують огорожувальні і несучі функції у будівлях [4-5].

Відповідно до умовних класів будівель та споруд вимоги до вогнестійкості елементів будівельних конструкцій називають ступенями вогнестійкості. У табл. 1.1. наведені конструктивні характеристики будівельних конструкцій, що використовують залежно від ступеня вогнестійкості [6].

Таблиця 1.1.

Конструктивні характеристики будівель залежно від їхнього ступеня вогнестійкості [6]

| Ступені вогнестійкості | Характеристики |
|------------------------|---|
| I, II | Будинки з несучими й огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону із застосуванням листових та плитних негорючих матеріалів |

| Ступені вогнестійкості | Характеристики |
|------------------------|--|
| III | Будинки з несучими та огороджувальними конструкціями із природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону. Для перекриттів дозволено застосовувати дерев'яні конструкції, що захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1, Г2. До елементів покриттів не пред'являються вимоги щодо межі вогнестійкості та поширення вогню, водночас елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку |
| IIIa | Будинки переважно з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса виконані з металевих незахищених конструкцій. Огороджувальні конструкції – з металевих профільованих листів або інших негорючих листових матеріалів з негорючим утеплювачем або утеплювачем груп горючості Г1, Г2 |
| IIIб | Будинки переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса виконані з деревини, яка була піддана вогнезахисній обробці. Огороджувальні конструкції виконують із застосуванням деревини або матеріалів на її основі. Деревина та інші матеріали груп горючості Г3, Г4 огороджувальних конструкцій мають бути піддані вогнезахисній обробці або захищені від дії вогню та високих температур |
| IV | Будинки з несучими та огороджувальними конструкціями з деревини або інших горючих матеріалів, захищених від дії вогню та високих температур штукатуркою або іншими листовими, плитними матеріалами. До елементів покриттів не висувають вимоги щодо межі вогнестійкості та межі поширення вогню, водночас елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку |
| IVa | Будинки переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса виконані з металевих незахищених конструкцій. Огороджувальні конструкції – з металевих профільованих листів або інших негорючих матеріалів з утеплювачем груп горючості Г3, Г4 |
| V | Будинки, які належать до несучих і огороджувальних конструкцій, до яких не висувають вимоги щодо межі вогнестійкості та межі поширення вогню |

Межі вогнестійкості будівельних конструкцій, що існують в Україні [1, 6], визначають експериментальним (дослідним) шляхом в спеціальних установках та розрахунковими методами для граничних станів, їх називають фактичними межами вогнестійкості. Необхідними межами вогнестійкості є встановлені нормами межі вогнестійкості та основних частин будівель і споруд. Перевагу під час визначення фактичних меж вогнестійкості несучих стін надають вогневим випробуванням.

Мінімальні межі вогнестійкості встановлюють відповідно до призначення будівель, місткості, поверховості, категорії виробництва щодо наявності автоматичних установок пожежогасіння та вибухопожежної безпеки.

Вимоги безпеки вважають виконаними [6], якщо:

$$M_{\text{ф}} \geq M_{\text{вим}}, \quad (1.3)$$

де $M_{\text{ф}}$ – фактична межа вогнестійкості будівельної конструкції;

$M_{\text{вим}}$ – необхідна межа вогнестійкості будівельної конструкції, що повинна відповідати умовам безпеки або нормам [6].

Однією з важливих умов забезпечення збереження безпеки є дотримання цих норм в процесі проектування й будівництва будівель і споруд.

Показники фактичного і необхідного ступеня вогнестійкості конструкцій будівлі, впроваджені для встановлення відповідності вимогам нормативних документів, що діють в Україні, будівель та споруд [1, 6]. Необхідний ступінь вогнестійкості об'єкту $B_{\text{н}}$ – це мінімальний ступінь вогнестійкості будівлі для його відповідності вимогам пожежної безпеки. Його визначають галузевими або спеціалізованими нормативними документами [1], також повністю визначають комплекс вимог щодо мінімальних меж вогнестійкості.

Для визначення фактичних меж вогнестійкості несучих стін перевагу надають вогневим випробуванням.

1.2. Особливості методу натурних випробувань несучих залізобетонних будівельних конструкцій

Експериментальний метод є нині найпоширенішим та найдостовірнішим методом визначення межі вогнестійкості, серед яких розрізняють стандартні вогневі випробування, які виконують з використанням окремих конструкцій, та повномасштабні випробування, які виконують на спеціально побудованих будівлях або окремих її блоках в реальних розмірах.

У наш час натурні випробування на визначення вогнестійкості виконують, зазвичай, для конструкцій, які раніше не випробовувались, або для яких не існує офіційно затвердженої методики виконання випробування.

За допомогою натурних вогневих експериментів визначення вогнестійкості будівель та споруд є питанням досить складним і неоднозначним. Використання саме такого методу ускладнене сучасними технічними рішеннями та конструктивними системами, а використовувати результати визначеної вогнестійкості окремих залізобетонних будівельних конструкцій для оцінювання вогнестійкості споруди загалом є некоректним.

Чинним нормативним документом в Україні, що регламентує виконання натурних вогневих експериментів будівель або їхніх фрагментів, є [7]. Цей документ встановлює загальні конкретизовані вимоги методу натурних вогневих випробувань будівельних об'єктів або їхніх фрагментів за температурним режимом, який наближений до стандартного.

Відповідно до [2] для виконання випробувань використовують реальний будівельний об'єкт, який відповідає проєктній документації на нього. У випадку, коли реальний будівельний об'єкт випробувати

неможливо, через економічні або технічні причини, допускають для виконання випробування використовувати фрагмент будівельної конструкції, яка має бути побудована з урахуванням вимог вищезазначеного стандарту. Для того, щоб створити пожежне навантаження, використовують за рахунок спалювання модельного вогнища створюється температурний режим, наближений до стандартного. Конструкція досліджуваного фрагмента має відповідати таким вимогам: об'ємно-планувальне рішення має бути розроблено на підставі проєктної документації на будівельний об'єкт; для багатоповерхових будівельних об'єктів повинно бути не менше трьох поверхів; найменшу межу вогнестійкості повинні мати несучі та огорожувальні конструкції; статичні навантаження на несучі конструкції досліджуваного фрагмента мають бути рівнозначними до статичних навантажень на споруду; має бути відокремлено від навколишнього середовища приміщення, в якому розташовують модельне вогнище пожежі, відповідно до проєктних рішень будівельного об'єкта.

Блок-схема виконання натурального вогневого випробування несучих стін наведена на с. 14.

Блок-схема виконання натурального вогневого випробування
несучих стін



Розрізняють дрібномасштабні та повномасштабні методи вогневих випробувань.

У роботі [8] описано історію та перспективи розвитку повномасштабних натурних вогневих випробувань, зокрема зазначено, що першими були виконані натурні випробування, які пов'язані із системою перекриття будівлі та її поведінкою під час пожеж [9]. Ці випробування відбулися в Денвері у 1890 році. Відтоді в США та Європі розвиток повномасштабних вогневих випробувань з імітацією реальних

пожеж активно розвивався. Як свідчить статистика, зазначена у роботі [8], з 1976 до 2011 року було виконано більше 30 натурних випробувань в Європі та США.

Наприклад (рис. 1.1.), великомасштабні вогневі випробування залізобетонної будівлі у м. Кардінгтоні.



Рисунок 1.1. Випробування на вогнестійкість у Кардінгтоні (Великобританія) 2001 рік: залізобетонна каркасна будівля, пожежне навантаження у вигляді дров, площею пожежі 225 м²

Повномасштабні випробування, виконані в Японії (м. Цукуба) в 2006 році на базі інституту будівельної інженерії Цюриха (рис. 1.2.).



Рисунок 1.2. Повномасштабні вогневі випробування триповерхової дерев'яної будівлі розміром 6,935×6,935 м з пожежним навантаженням у вигляді житлової фурнітури та дров

У розрізі наукових досліджень в Україні виконали декілька натурних вогневих випробувань (табл. 1.2.).

Таблиця 1.2.

Натурні вогневі випробування в Україні [10, 11]

| Рік і місце виконання натурних випробувань | Тип будівлі, що досліджували |
|--|--|
| 1996 рік, м. Вінниця, Б. Демчина | П'ятиповерховий житловий будинок системи ГОЛЬДПЛАН розмірами 24,25×21×17,1 м, пожежне навантаження – дрова |
| 2008 рік, м. Львів, Т. Шналь | Фрагмент панельного будинку розміром 7,3×7,5×7,5 м |

Результати виконаних натурних випробувань наведено у роботах [10–12]. Невелику кількість виконаних натурних експериментів можна пояснити значними матеріальними витратами та досить високою складністю процесу виконання. В Україні останні вогневі випробування були виконані у 2008 році у м. Вінниці [11]. Пожежа ініціювалась в кімнаті першого поверху, другого поверху та на сходовому майданчику між першим й другим поверхами за допомогою дерев'яних дощок, складених як штабелі розміром 0,9×0,9×0,9 м.

Натурне випробування виконували на фрагменті будівлі розміром 7,3×7,5 заввишки 7,5 м (рис. 1.3.) [11].



Рисунок 1.3. Повномасштабне пожежне випробування фрагмента великопанельної будівлі

На недостатній розвиток повномасштабних вогневих випробувань впливають як економічно затратна складова, так і не зовсім пристосована до умов сьогодення нормативна база.

Перевагою розглянутих натурних випробувань є можливість отримати експериментальні дані як для усього об'єкта, так і для окремих його елементів в умовах вогневого впливу пожежі.

Головним недоліком натурних вогневих випробувань є висока вартість і великі трудовитрати для їхньої реалізації.

1.3. Особливості методу вогневих випробувань у печах несучих залізобетонних будівельних конструкцій

Більшість методів випробування на вогнестійкість різних видів будівельних конструкцій базуються на загальних стандартних положеннях. Варто зазначити, що відмінності у номенклатурі будівельних конструкцій, що підлягають випробуванню, в мінімально допустимих розмірах зразків для випробувань, критеріях визначення досягнення межі вогнестійкості не є суттєвими. Відповідно до національних стандартів України [1-2] випробування на вогнестійкість несучих стін виконують в умовах їхнього навантаження силовими факторами, що відповідають нормативному навантаженню згідно із розрахунковою схемою конструкції будівлі та повинні бути піддані вогневій дії. Такі умови створюються відповідними вузлами випробувальних установок, які з'єднують вогневу піч із опорно-навантажувальним пристроєм.

На рис. 1.4. показано схему подібної установки відповідно до стандартів [13].

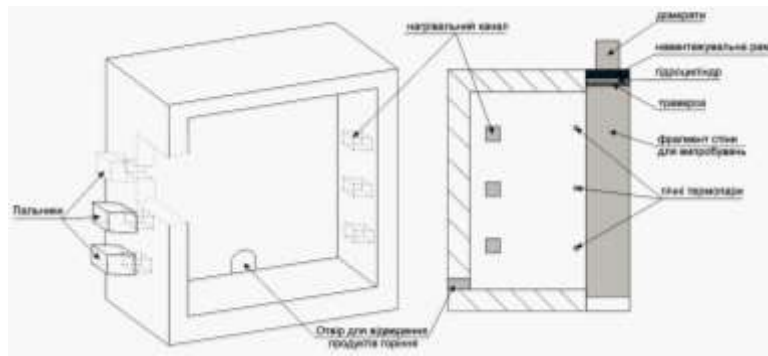


Рисунок 1.4. Схема вертикальної вогневої установки для виконання експерименту на вогнестійкість несучих стін [13]

У вищезазначених нормативних документах встановлені вимоги щодо конструкції для виконання вогневих випробувань, особливостей її елементів, контрольно-вимірювальних пристроїв, її специфіки, послідовність виконання етапів вогневого випробування та оброблення отриманих результатів.

Нагрівальні печі мають бути побудовані таким чином, щоб забезпечувати нагрівання стінових елементів з однієї сторони [1,6].

Для прикладу на рис. 1.5.-1.7. зображено схеми вертикальних вогневих випробувальних установок, які використовують у різних країнах світу для виконання випробувань на вогнестійкість несучих стін.

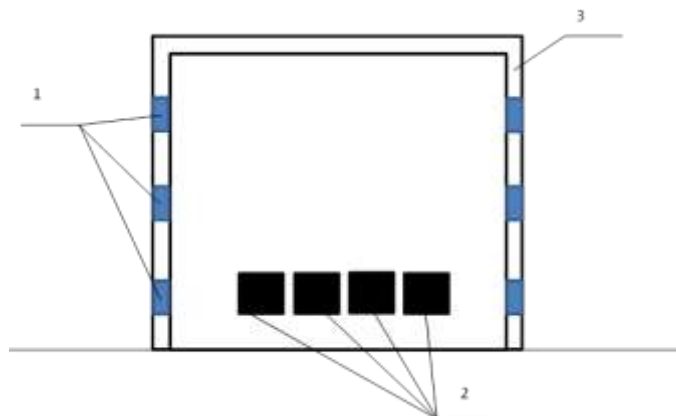


Рисунок 1.5. Вертикальна вогнева піч для виконання випробувань на вогнестійкість несучих стін: 1 – отвори для встановлення пальників, 2 – отвори для видалення продуктів горіння; 3 – стіни камери вогневої печі

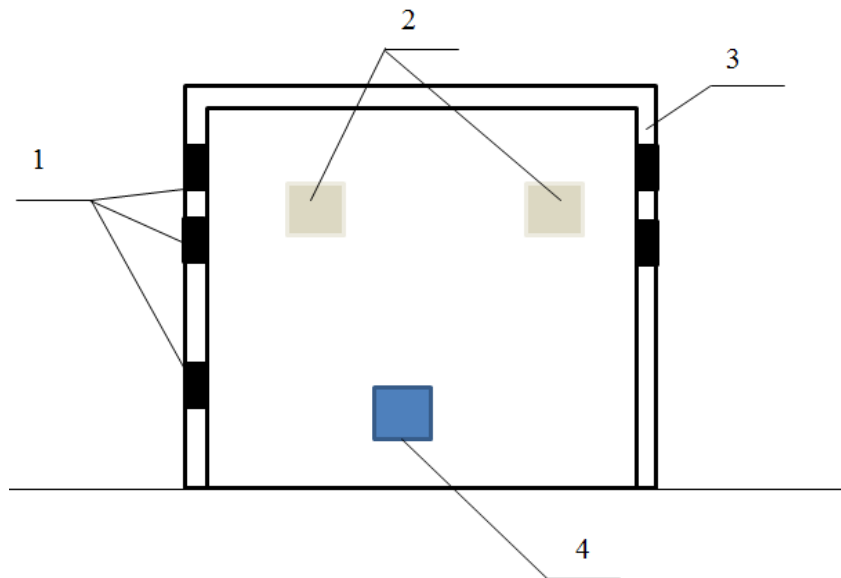


Рисунок 1.6. Вертикальна вогнева піч для виконання випробувань на вогнестійкість несучих стін: 1 – отвори для пальників; 2 – оглядові вікна; 3 – стіни вогневої печі; 4 – отвір для видалення продуктів горіння

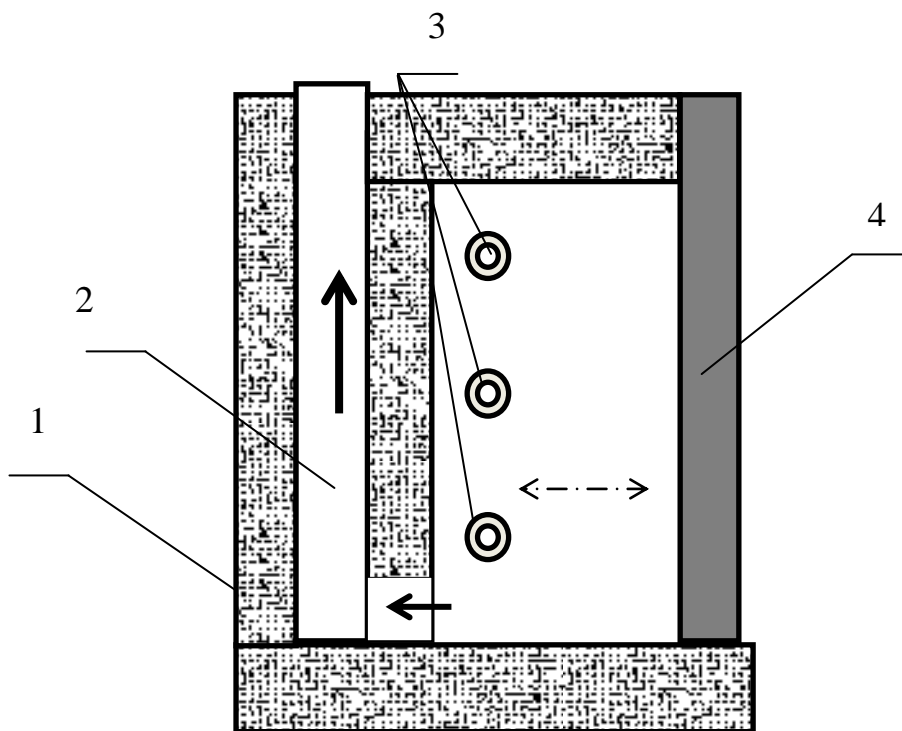


Рисунок 1. 7. Вертикальна вогнева піч для виконання випробувань на вогнестійкість несучих стін: 1 – корпус печі; 2 – канали видалення продуктів згорання; 3 – пальники; 4 – зразок, що підлягає випробуванню

Геометричні параметри вогневих печей повинні забезпечувати можливість виконання випробовування зразків, проектні розміри яких повинні відповідати елементам будівельних конструкцій. Якщо це неможливо зробити, системою стандартів [1] встановлено, що мінімальні висота і ширина вертикальної будівельної конструкції повинні бути 3 000 мм, відповідно до мінімальної висоти і ширини камери вогневої печі. Глибина внутрішнього простору печі – не менше за 0,8 м.

Товщина футеровки печі повинна бути не меншою, ніж 50 мм, матеріал, з якого вона виготовлена, повинен забезпечувати достатню термоізоляцію камери, а теплова інерція під час нагрівання матеріалу футеровки до температури 500 °С повинна задовольняти нижчезазначену вимогу [1, 2]:

$$\sqrt{\lambda \rho c} \leq 500 \text{ Вт с}^{1/2} \text{ см}^{-1} \cdot \text{°С}^{-1}, \quad (1.4)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт · м⁻¹ · °С⁻¹;

ρ – густина, кг/м³;

c – питома теплоємність, Дж · кг⁻¹ · °С⁻¹.

Нагрівальна система повинна забезпечувати такі чинники:

- вмикати автоматичну паливно-форсункову систему на рідкому паливі (гас, дизпаливо);

- мати пальники (форсунки), які синхронно вмикаються із максимальною різницею у 60 с;

- факели, що формують форсунки у каналах, не повинні торкатися обігрівальних поверхонь.

Проаналізувавши нормативні документи [1–2, 6], слід зазначити, що встановлені вимоги мають низку недоліків. Не зазначені такі вимоги: мінімальні розміри зразка, який випробовують; характеристики для визначення рівномірності обігрівання зразків, що піддаються

випробуванню; принцип розташування пальників та їхня необхідна кількість; розташування та розміри вентиляційних отворів для рівномірного обігрівання та обтікання пічними газами конструкцій, які випробовуються; відсутні уніфіковані вимоги для способу виконання вогневих випробувань, пічних конструкцій та для створення надлишкового тиску.

Відповідно до [1] конструкція опорно-навантажувальної системи має забезпечити випробування зразків несучих будівельних конструкцій під навантаженням. Опорно-навантажувальна система повинна складатися з опорної рами та гідравлічних домкратів із траверсою. Розподілення навантаження має відповідати розрахунковій схемі, яка визначена у нормативних документах. У технічній документації наведені значення, яким повинно відповідати навантаження, що встановлюють на основі умови створення в розрахункових перерізах зразків напруг, а також необхідно забезпечити умови, щоб вантажі не зміщувались під час деформації зразка.

Нині існує велика кількість вогневих печей, які не обладнані опорно-навантажувальною системою, у зв'язку з цим нормативним документом [6] допустимо виконувати експерименти без навантаження елементів несучих стін і колон, для яких в лабораторії неможливо відтворити умови навантаження, визначені у розрахунковій схемі, під час виконання вогневого випробування через технічні причини.

У роботі [14] розроблено методику, яка дозволяє на основі даних, одержаних в процесі вогневих випробувань будівельних конструкцій у вогневій печі без механічного навантаження, за стандартною температурною кривою пожежі, згідно з вимогами стандартів [1], оцінити межу вогнестійкості за умови застосування міцнісного розрахунку. Також зазначено, що такий метод позбавлений характерних недоліків, оскільки він дозволяє вилучити із експериментальних установок

навантажувальне обладнання й контрольно-вимірювальні прилади, які пов'язані з вимірюванням зусиль та деформацій. Це також дозволяє значно знизити трудовитрати та вартість на підготовку і виконання експериментів, водночас стає неможливим ризик обвалення зразка, що підлягає випробуванню, разом із вантажами у камеру вогневої печі і, як наслідок, ушкодження її огорожувальних конструкцій та футеровки, що мають найбільшу вартість. Використання розрахунково-експериментального методу дозволяє підвищити точність, оскільки унеможливлено вплив невідповідності габаритних розмірів та граничних умов елемента, що підлягає випробуванню, як складової відповідної структури.

Недоліки відповідно до вимог опорно-навантажувального вузла можуть стати причиною неконтрольованих процесів, які відбуваються під час випробування, та сильно вплинути на кінцевий результат, як наслідок можна отримати дані, які будуть не точні та відрізнятимуться від реальних даних.

Контрольно-вимірювальна система в установках для виконання випробувань на вогнестійкість несучих стін має пристрої, які за призначенням можна розділити на три основні групи. До I групи належать прилади для визначення температури у камері печі та зразків несучих стін, які випробовують. До II групи належать контрольно-вимірювальні прилади для визначення деформаційно-силових характеристик напруженого стану будівельних зразків під час випробування. До III групи належать прилади, які призначені для контролю настання граничного стану, а саме втрати цілісності.

Щодо I групи, у нормативних документах [1 - 2, 5] зазначено, що під час вимірювання температури у вогневій печі біля конструкції, яку досліджують, встановлено на відстані від 90 мм до 110 мм не менше 6

термопар, від поверхні зразка. Відстань має бути не менше, ніж 200 мм від вимірювального спаю термопар до стінок печі.

Для контролю температури на обігрівальних поверхнях зразків в процесі дослідження настання одного з граничних станів – втрати теплоізолювальної здатності використовують 5 термопар за середньою температурою поверхні, одну термопару розташовують у геометричному центрі відповідної поверхні стінового елемента, а інші чотири у геометричних центрах чотирьох однакових прямокутних секцій. Якщо стіновий елемент є суттєво неоднорідним, тобто частина неоднорідності площею більше за 0,1 м², повинна бути встановлена термопара на кожній з таких неоднорідностей.

Відповідно до стандартів [1, 5-6] для визначення температури у печі можуть бути застосовані термопари, які покриті захисним кожухом або з неізолюваними проводами. Захисний кожух від вимірювального спаю термопар має бути зварений та знятий на довжині не менше 25 мм. Схема термопару із захисним кожухом показана на рис. 1.8.

Є декілька видів термопар, що відрізняються за своїм призначенням. Вимоги до технічних характеристик термопар для виконання вимірювань подані у табл. 1.3.

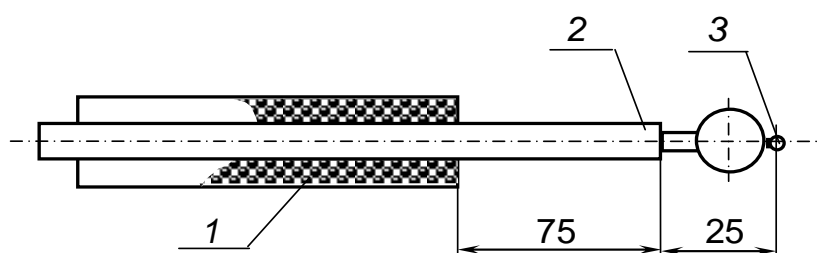


Рисунок 1.8. Схема термопару для виконання вогневих випробувань: 1 – теплозахисний кожух; 2 – захисна оболочка; 3 – вимірювальний спай

Таблиця 1.3.

Параметри термопар

| Призначення | Діаметр дроту, мм | Тип термопар | Діапазон вимірювання, °С | Похибка, °С |
|---|-------------------|--------------|--------------------------|-------------|
| Вимірювання температури у камері печі | $\leq 1,5$ | ТХА | 0 – 1300 | ± 15 |
| Вимірювання температури у несучих залізобетонних стінах | $\leq 0,75$ | ТХА | 0 – 600 | ± 10 |

Відповідно до стандартів [1, 5 – 6] технічні характеристики термопар і їхнє розташування на поверхні та у внутрішніх шарах будівельних конструкцій, що піддаються випробуванням, мають низку недоліків, а саме: може бути задоволена декількома способами вимога щодо рівномірності розташування термопар у перерізі стін, що може спричинити істотну різницю під час оброблення результатів вимірювань; не повністю визначені вимоги щодо розміщення термопар на поверхнях будівельних конструкцій їхніх елементів та дозволено багатоваріантність, що може вплинути на результати вимірювань; у перерізах зразків є необґрунтовано великою похибка, що закладають для вимірювання температури, а у перерізах стінових елементів навпаки є низькою верхня границя діапазону вимірювання температури.

II група пов'язує контрольно-вимірювальні прилади для визначення деформаційно-силових параметрів напруженого стану будівельних зразків під час вогневого випробування з прикладанням механічного навантаження. Насамперед вимірюють поздовжні і поперечні переміщення зразка для випробувань та силу, що розвивається домкратами. Для вищезазначених вимірювань використовують прилади, характеристики яких подані у табл. 1.4. [1, 5-6].

Таблиця 1.4.

Вимоги щодо похибки пристроїв для контролю параметрів напружено-деформованого стану несучих залізобетонних стін

| Призначення | Тип приладу | Похибка |
|--|---|--------------------|
| Вимірювання навантаження, прикладеного на фрагмент | Штатний динамометр силового пресу | $\pm 5 \%$ |
| Вимірювання переміщень фрагмента | Градуйована лінійка, індикатори, лазерні далекоміри | $\pm 2 \text{ мм}$ |

Перелік недоліків стосовно вимог контрольно-вимірвальних деформаційно-силових приладів, а саме: вимоги щодо визначення точності приладів силових навантажень, не зазначені; невідомо як визначають похибку приладів для контролю зміщень будівельних конструкцій; чітких вимог щодо положення точок, в яких визначають зміщення, немає; чітких вимог щодо типу деформацій, що вимірюють, немає.

Для контролю настання граничного стану, а саме втрати цілісності, належать прилади, які відносяться до III групи. Для цього використовують ватний тампон, який виготовляють з м'якої нефарбованої бавовняної вати розмірами $100 \times 100 \times 20$ мм, в складі якого не повинно бути ніяких інших волокон. Перед випробуванням, протягом не менше 30 хв, тампон має бути висушений за температури 105 ± 5 °С, після сушіння його маса повинна бути від 3 до 4 г.

Для контролю настання втрати цілісності стержні щупів виготовляють діаметром $6,0 \pm 0,1$ мм та $25,0 \pm 0,2$ мм із нержавіючої сталі. З теплоізолювального матеріалу мають бути виготовлені тримачі щупів та відповідно гарантувати їх безпечне застосування.

Наприклад, під час виконання експериментального випробування на вогнестійкість несучої залізобетонної стіни за допомогою вогневої

печі ВП-1, інв. № 20 (Атестат № 24-2/5983) використовували засоби виміральної техніки, які зазначені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5.

Засоби виміральної техніки для виконання вогневого випробування

| № п/п | Найменування обладнання або приладу | Діапазон вимірювання |
|-------|--|----------------------------------|
| 1. | Лінійка вимірвальна (інв. № 4) | від 0 до 1000 мм |
| 2. | Секундомір СОСпр-2б-2-010 (інв. № 13) | від 0 до 60 хв |
| 3. | Система контролю температури на основі блоків Вега-5 (інв. № 26) | від -5 до 1300 °С |
| 4. | Термопари ТХА, 14 одиниць (інв. 07-020) | від 0 до 1100 °С |
| 5. | Термопари N (1100 мм), 6 одиниць (інв. № 047-052) | від 0 до 1200 °С |
| 6. | Термогігрометр АРТ-06917 (інв. № 2) | від 25 до 90 % від 0 до 50 °С |
| 7. | Штангенциркуль ШЦЦ-IIa (інв. № 11) | від 0 до 300 мм |
| 8. | Мановакуумметр цифровий ММЦ-200 (інв. № 5) | від 0 до +200 Па |
| 9. | Сушильна шафа | від 20 до 100 °С |
| 10. | Ваги електронні ULTRA (інв. № 7) | від 0 до 200 г |
| 11. | Щупи діаметром: 6 мм (інв. № 9) 25 мм (інв. № 10) | 6 мм 25 мм |
| 12. | Disto D3a BT (інв. № 18) віддалемір лазерний ручний | від 0,05 до 100 м |
| 13. | Disto D3a BT (інв. № 17) віддалемір лазерний ручний | від 0,05 до 100 м |

Відповідно до нормативних документів [1, 5-6] щодо граничних умов випробувального зразка є припущення можливості виконання випробувань з навантаженням, яке істотно відрізняється від діючого відповідно до розрахункової схеми будівлі або без навантаження.

Також виконання вогневих випробувань допускається без контролювання надлишкового тиску, якщо це визначено нормативними документами щодо методів випробувань на вогнестійкість конструкцій конкретних типів. Водночас настання граничних станів, втрати несучої здатності та цілісності зазначають без врахування цих особливостей, цей факт може помітно вплинути на достовірність та точність меж вогнестійкості.

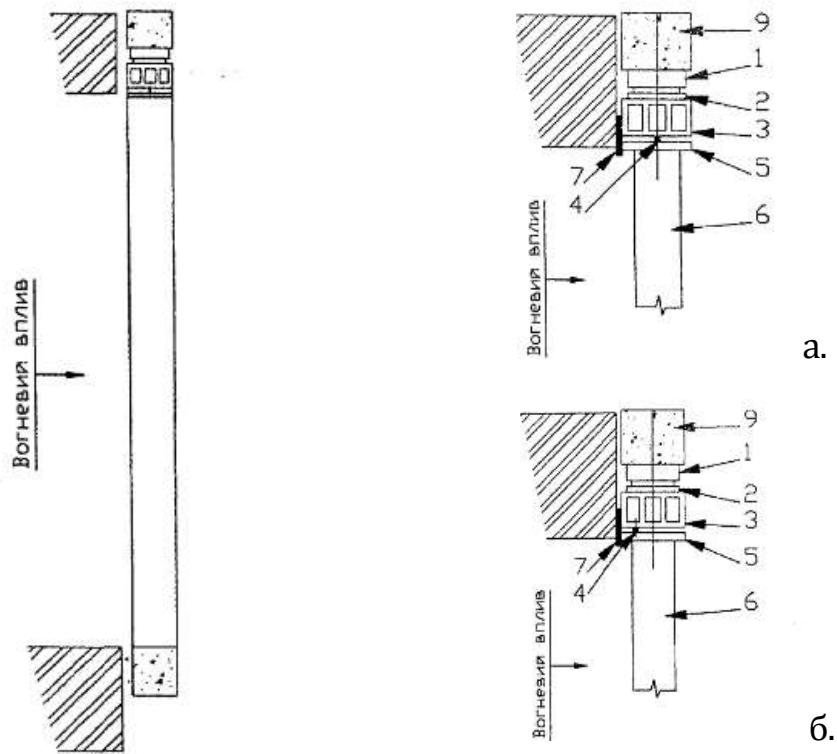


Рисунок 1.9. Схема прикладення до стінового елемента навантаження без ексцентриситету (а) та з ексцентриситетом (б) під час його випробування на вогнестійкість: 1 – гідравлічний домкрат; 2 – динамометр; 3 – траверса; 4 – прут 15×15 мм; 5 – основа; 6 – зразок для випробування; 7 – волокниста ізоляція; 8 – індикатор годинникового типу; 9 – випробувальна рама [2]

Аналізуючи вищезазначене, випробування вертикальних будівельних конструкцій без навантаження або з меншим навантаженням повинно бути аргументоване, тому що за такого способу виконання вогневих випробувань не враховують величину діючого навантаження, міцність, тип бетону та арматурної сталі, довжину та гнучкість залізобетонних конструкцій та ін.

Зараз існують серйозні технічні труднощі для створення зазначених умов в реальних установках – багато таких установок взагалі не передбачають прикладання силових навантажень і тільки деякі з них взагалі працюють.

1.4. Особливості розрахункових методів оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій

Альтернативою методам оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін за допомогою стандартних вогневих випробувань є розрахункові методи, які застосовують для проєктування вогнестійких будівельних конструкцій. Вони базуються на введенні під час розрахунку коефіцієнтів зниження на властивості матеріалів. У випадку застосування таких методів не існує обмежень на граничні умови, геометрію та силові фактори елементів, які виникають в процесі виконання вогневих випробувань.

Розрахункові методи можуть бути використані для оцінювання вогнестійкості конструктивної системи та її частини, будь-яких видів окремих будівельних конструкцій, випробування будівельних конструкцій на вогнестійкість для інтерполяції та екстраполяції результатів, а також визначення сфери застосування цих результатів.

Теорія поведінки вказаних матеріалів достатньо розвинута і містить широкий перелік математичних моделей, які описують всі

значимі ефекти від самих простих до складних, що спостерігаються, а саме: пластичні деформації, вигорання каркасу матриці матеріалів, тріщиноутворення, контактні ефекти між арматурою та матрицею, фільтрація пари крізь пори матриці матеріалів, зміна міцності, умов терморозширення матеріалів тощо. Математичні моделі, що застосовують, мають враховувати ці особливості.

Розрахункові методи умовно можна розділити на:

- спрощені;
- уточнені;
- окрема група методів, які згідно з термінологією системи

стандартів називаються альтернативними [15, 16].

Етапи розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій:

I – вибір відповідних проектних сценаріїв пожежі;

II – визначення відповідних температурних режимів;

III – розрахунок підвищення температури в будівельних конструкціях;

IV – розрахунок механічної роботи конструктивної системи в умовах пожежі.

Якщо розглядати сценарій реальної пожежі для розрахунку теплового впливу пожежі у будинку, мають бути застосовані спрощені або уточнені моделі пожежі.

Для сценарію умовної пожежі варто застосовувати номінальні температурні режими зокрема зовнішньої та вуглеводневої пожежі та стандартний температурний режим.

Залежно від об'єкта, який аналізують, та обраного сценарію пожежі може бути застосований уточнений, спрощений або табличний метод.

Ці методи рекомендовано застосовувати згідно з [5]. Вибір методу розрахунку конструкції обирають відповідно до табл. 1.6. у складі всієї конструктивної системи на основі аналізу її реальної роботи. У процесі

розрахунку вогнестійкості конструкції передбачено використання трьох груп розрахункових методів.

Таблиця 1.6.

Методи перевірки вогнестійкості

| | Табличний метод | Спрощений метод | Уточнений метод |
|--|--|--|---|
| Аналіз окремої конструкції. Конструкцію розглядають окремо. Непрямі впливи не враховують. | Так Дані наведено для стандартного температурного режиму | Так Криві розподілу температур та знижені властивості матеріалів наведені для стандартного температурного режиму | Так Наведено тільки основні положення |
| Аналіз частини конструктивної системи. Враховані непрямі вогневі впливи | Ні | Так Криві розподілу температур та знижені властивості матеріалів наведені для стандартного температурного режиму | Так Наведено тільки основні положення |
| Загальний розрахунок конструктивної системи. Розглядаються непрямі вогневі впливи на всю систему | Ні | Ні | Так Наведено тільки основні положення |

Відповідно до табличного методу розрахунку, який є найбільш простим, вогнестійкість конструкції забезпечено побудовою згідно з визнаними розрахунковими рішеннями. Реалізація цього методу забезпечення вогнестійкості конструкцій є простим інженерним

методом, який може бути виконаний на основі значної кількості табличних даних [17-18], які розроблені за результатами раніше виконаних теоретичних та експериментальних досліджень.

До спрощених методів належать метод ізотерм та зонний метод, який застосовують для несучих стін із залізобетону. Ці методи застосовують на основі використання умовного перерізу та коефіцієнтів зниження несучої здатності бетону й арматури внаслідок дії температури.

Метод ізотерми [19] – спрощений метод розрахунку, стосується загального зменшення розміру поперечного перерізу з урахуванням пошкодженої зони поверхневого шару бетону температурою. Товщина пошкодженого бетону A_{500} відповідає середній глибині розташування ізотерми (з температурою $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) в стисненій зоні поперечного перерізу. Пошкоджений бетон (з температурою більшою, ніж $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) вважається таким, що не забезпечує несучу здатність елемента, його вилучають з розрахунку, водночас умовний поперечний переріз зберігає свої початкові значення міцності та модуля пружності.

Для визначення розрахункового поперечного перерізу товщину пошкодженого бетону a_{500} за ізотерми $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно помножити на коефіцієнт k . Тобто для розрахунку умовного перерізу стін необхідно використовувати формулу (1.5) [19]:

$$a_z = k a_{z,500}, \quad (1.5)$$

Коефіцієнт k враховують для зміни від $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $460\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значення 1,1 для класу 1 є рекомендованим [19] та для класу 2 – 1,3. Для класу 3 необхідно використовувати більш точні методи.

Більш трудомістким, але й більш точним, вважають зональний метод [19] – поперечний переріз ділять на декілька частин (прямокутників), для яких ураховують середню температуру,

відповідний модуль пружності (якщо застосовують) кожної зони та середній опір на стиск. Метод придатний для будь-яких досліджених температурних режимів пожежі, але значна кількість наявних даних стосується стандартного температурного режиму. За відсутності готових даних прогрівання можна виконати розрахунок температурної задачі та знайти середні температури в окремих частинах розрахункових перерізів.

Товщину пошкодженої зони визначають за формулою (1.6.) [19]:

$$a_{z1} = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right], \quad (1.6)$$

де w – половина повної ширини поперечного перерізу;

$k_{c,m}$ – середній коефіцієнт зниження міцності бетону для всіх зон;

$k_c(\theta_M)$ – коефіцієнт зниження міцності бетону на стиск.

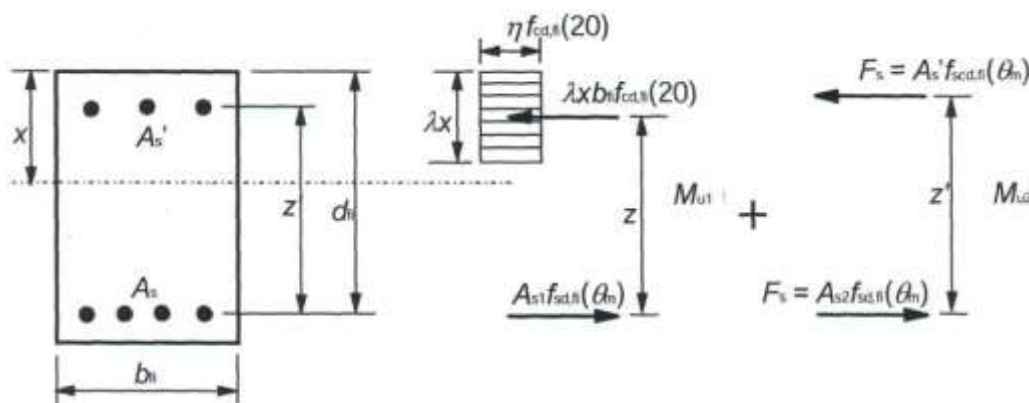


Рисунок 1.10. Розрахункова схема умовного перерізу: b_{fi} – ширина перерізу; d_{fi} – робоча висота перерізу; A_s – площа розтягнутої арматури; A'_s – площа стиснутої арматури; $f_{cd,fi}(20) = f_{ck} / \gamma_{c,fi}$ – розрахункова міцність бетону на стиск за нормальної температури; $f_{sd,fi}(\theta_m)$ – розрахункова міцність арматури на розтяг під час пожежі; $f_{scd,fi}(\theta_m)$ – розрахункова міцність арматури на стиск під час пожежі [5]

Коли умовний поперечний переріз знайдено та визначено міцність і модуль пружності бетону під час пожежі, за методикою розрахунку за нормальних температур виконують розрахунок на вогнестійкість із застосуванням значень коефіцієнту надійності матеріалу в умовах пожежі ($\gamma_{M,fi}$).

За формулою (1.7) для визначеної частини визначають середній коефіцієнт зниження опору на стиск, включно з коефіцієнтом $(1 - 0,2/n)$, що враховує в процесі розрахунку зміну температури кожної зони [19]:

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n)}{m} \sum_{i=1}^m k_c(\theta_i), \quad (1.7)$$

де n – кількість паралельних зон в ширині w ;

w – половина повної ширини;

m – повна кількість зон.

На рис. 1.11. зображена структурна схема визначення меж вогнестійкості залізобетонних колон за допомогою спрощених розрахункових методів.

Вищезазначені методи не вимагають складних розрахунків та реалізуються за мінімальної кількості початкових даних, тому набули широкого застосування та увійшли до стандартних методик відповідних норм багатьох провідних держав [19].



Рисунок 1.11. Структурна схема спрощених розрахункових методів визначення вогнестійкості будівельних конструкцій

Але ці методи мають недолік, який полягає у виникненні істотної похибки результатів розрахунку (25-30 %). Такі похибки обумовлені простотою моделей, які використовують, і недостатньою гнучкістю початкових даних, які не враховують технологію виготовлення залізобетону. У деяких випадках за табличного методу чи методу критичної температури навіть не враховують діючі навантаження.

Також альтернативними є уточнені методи, вони існують для врахування пластичної деформації та засновані на деформаційних моделях, які використовують рівняння рівноваги, що складаються для найбільш навантаженого перерізу стінового елемента з огляду на гіпотезу плоских перерізів [20]:

$$\begin{cases} \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Y_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Y_{sj} = M_T \\ \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} = N_T \end{cases}, \quad (1.8)$$

де M_T, N_T – поздовжня сила і зовнішні головні моменти відповідно;

$A_{bi}, Y_{bi}, \sigma_{bi}$ – координати центру тяжіння i -ї ділянки бетону, площа і напруження на рівні його центру тяжіння;

$A_{sj}, Y_{sj}, \sigma_{sj}$ – координати центру тяжіння i -го стержня арматури, площа і напруження у ньому.

У ділянках бетону і арматурної сталі напруження визначають із використанням діаграм деформування, як функції кривизни стінових елементів за виразами та крайових деформацій [21]:

$$\sigma_{bi} = f_1(\varepsilon_{bi}), \sigma_{sj} = f_2(\varepsilon_{sj}),$$

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{bi},$$

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{sj}, \quad (1.9)$$

де ε_0 – відносна деформація у поперечному напрямку крайової точки перерізу;

$1/r$ – кривизна стінового елемента.

Такі моделі дозволяють врахувати пластичні деформації елементів, але не розглядають параметри конкретного напружено-деформованого стану стіни.

Відомі роботи [22-24], в яких вищезазначені методи успішно застосовують для визначення фактичної межі вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних конструкцій.

У роботі [25] розглянуті математичні моделі стінових елементів, які виконані із силікатних блоків за допомогою застосування комп'ютерної системи ABAQUS, та встановлено, що метод кінцевих елементів дає точні результати.

Уточнені методи розрахунку для теплотехнічного розрахунку базуються на основних принципах і припущеннях теорії теплопровідності.

Розподіл температури у залізобетонних конструкціях визначають незалежно від існування армування.

Матеріали, з яких складаються несучі стіни, мають пористий каркас із певним вмістом води, який має гідрокристалічну будову. Саме тому процес нагрівання супроводжується конденсацією, випаровуванням і фільтрацією води у рідкому та газоподібному станах. Відповідно теплофізичні характеристики не мають прямого фізичного змісту і є ефективними. Такий підхід дає достатньо точні результати та набув широкого поширення. В такому випадку рівняння теплопровідності називають квазілінійним [26-28] та записують у вигляді:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T), \quad (1.10)$$

де $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності;

$c_p(T)$ – питома теплоємність та густина;

$\rho(T)$ – залежність від температури прогрівання внутрішнього шару конструкції.

Для розв'язування рівняння теплопровідності (1.11) використовують граничні умови III роду [29]:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_p - T_w), \quad (1.11)$$

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

T_p, T_w – відповідно температури поверхні стіни і пожежного середовища, °C;

r – поточна просторова координата.

Коефіцієнт теплообміну враховує дію інфрачервоного випромінювання та конвекції, його визначають за формулою [29]:

$$\alpha = \alpha_b + \alpha_k \quad (1.12)$$

де α_b – коефіцієнт теплообміну від випромінювання;

α_k – коефіцієнт теплообміну конвекцією.

1.5. Особливості експериментально-розрахункових методів оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій

Для визначення фактичної межі вогнестійкості найбільш ефективно застосовувати експериментально-розрахункові методи.

Експериментально-розрахунковий метод оцінювання вогнестійкості несучих стін полягає в поєднанні вогневих випробувань та розрахункової інтерпретації їхніх результатів на основі однієї із відомих математичних моделей напружено-деформованого стану відповідного елемента. Виконання вогневих випробувань досліджуваних зразків, близьких до реальних конструкцій, забезпечує високу достовірність вихідних результатів, а застосування розрахунку надає гнучкості та універсальності цьому підходові через врахування у складі відповідної структури, у разі термосилової дії пожежі реальних умов за режиму роботи несучих стін. Такий підхід дозволяє також суттєво зменшити вартість вогневих випробувань і трудомісткість за рахунок усунення опорно-навантажувального вузла з випробувальних установок або

суттєвого зменшення його потужності, завдяки чому можна зменшити габарити випробувальних установок.

Експериментально-розрахункові методи, які добре відомі та широко застосовані на практиці, засновані на ідентифікації ефективних теплофізичних характеристик бетону під час виконання експериментів за умов нагрівання бетонних зразків, що підлягають випробуванню, за різних геометричних умов та конфігурацій самих зразків. Вказані вищезазначені методи є ефективними та дозволяють врахувати феноменологію технологічної спадковості залізобетону на основі порівняно недорогих та малотрудомістких експериментів. Проте їхнє застосування обмежене, якщо визначати вогнестійкість несучих конструкцій, тому що за такої умови характеристики міцності залізобетону не можна ідентифікувати, це є причиною виникнення значних похибок.

У роботах [30-40] описаний ефективний метод, заснований не тільки на ідентифікації теплофізичних характеристик, а і міцнісних характеристик бетону і арматурної сталі у вигляді їхніх коефіцієнтів роботи, в умовах нагрівання. Основний недолік цього методу полягає у використанні складних математичних моделей НДС залізобетону в умовах пожежі. Цей метод вимагає високої кваліфікації персоналу, який здійснює розрахунки, та великої кількості розрахункових процедур. Однак цей метод є більш точним.

Висвітлений в роботі [36] експериментально-розрахунковий метод ґрунтується на представленні перерізів стиснутих елементів дискретними моделями із його фізичними розділеннями на відповідні зразки, які моделюють внутрішні шари бетону. Кожний із зразків піддають температурній дії і комбінованій силовій, яку відчуває усередині перерізу відповідний шар. Водночас спочатку ідентифікують теплофізичні характеристики бетону, а потім розраховують режим

термосилової дії за допомогою експериментального устаткування для реалізації еквівалентного режиму. Після цього отримані результати випробувань підлягають математичній обробці, внаслідок чого фактичну межу вогнестійкості визначають за обчисленими інтегральними критеріями.

Перевагою зазначеного методу є те, що він може бути легко автоматизований, отримуємо результати згідно з простими математичними виразами, та не вимагає високої кваліфікації персоналу.

Основний недолік такого методу – це відсутність універсальності, оскільки він може бути застосований лише для стиснутих елементів залізобетонних конструкцій.

Спільним недоліком усіх розглянутих експериментально-розрахункових методів є необхідність використання малогабаритних зразків для випробувань, що обумовлює необхідність додаткового обчислення від цих зразків до реальних конструкцій. Відсутність єдиних вимог є іншим серйозним недоліком відносно експериментального обладнання для реалізації режиму випробувань.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ МАЛОГАБАРИТНОЇ ВОГНЕВОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Застосування математичних моделей на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса для описування процесів, що відбуваються в камері вогневої печі

У першому розділі розглянуто основні методи виконання вогневих випробувань, зазначені їхні переваги та недоліки. Також обґрунтовано, що виконання вогневих випробувань експериментально-розрахунковим методом за допомогою сучасного програмного забезпечення дає змогу враховувати всі необхідні параметри аналізованих теплових процесів, дослідити вплив геометричних та конструктивних параметрів печі для випробування залізобетонних конструкцій на адекватність результатів.

Інтегральні, зонні та польові моделі [41-44] використовують для математичного обчислення процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей.

За допомогою інтегральних моделей маємо можливість отримати середні значення параметрів стану середовища в камері печі в будь-який момент випробування.

У зонних моделях весь простір камери вогневої печі ділять на характерні просторові зони та визначають середні значення параметрів стану середовища для будь-якого моменту часу в цих зонах.

Польові або диференціальні моделі тепломасообміну в камері вогневої печі дозволяють спрогнозувати просторово-часовий розподіл:

- швидкостей газового середовища;
- температур;
- концентрацій тиску та густин у будь-якій точці та компонентів середовища [6].

CFD (computational fluid dynamics – англ. обчислювальна гідродинаміка) – ці польові моделі порівняно із зональними та інтегральними моделями є більш потужним та універсальним інструментом. У польових моделях виокремлюють тисячі або десятки тисяч маленьких контрольних обсягів, замість однієї або кількох великих зон, не пов'язаних з передбачуваною структурою потоку [44-45]. Для кожного з цих обсягів розв'язують систему рівнянь у часткових похідних за допомогою різних методів, які виражають принципи локального збереження енергії, маси, імпульсу, та інших компонентів. Отже, динаміка розвитку процесів залежить не від апріорних припущень, а від результатів розрахунку польових моделей, де застосовують систему рівнянь Нав'є-Стокса [4, 6-7, 43, 46-47].

Вихідну систему рівнянь Нав'є-Стокса записують у двох формах, що не суперечать одна одній, перша форма – систему рівнянь записують у фізичних змінних швидкість – тиск, а друга форма – у змінних вихор – функція струму. Існує і третя форма розв'язання задач гідромеханіки, за якої використовують змінні швидкість – вихор.

Проаналізувавши наукову літературу А. В. Сохацького [48-49], варто зазначити, що описано обмежену кількість випадків, які допускають аналітичне інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса, тому лише за умови використання численних методів можливий прогрес у цій галузі, для цього використовують кілька десятків різновидів різницевих схем.

Рівняння Нав'є-Стокса описує рух і теплопередавання в'язкої нестисливої рідини [50]. Вищезазначені рівняння застосовують у математичному моделюванні багатьох природних явищ, технічних задач та є одними із найважливіших у гідродинаміці.

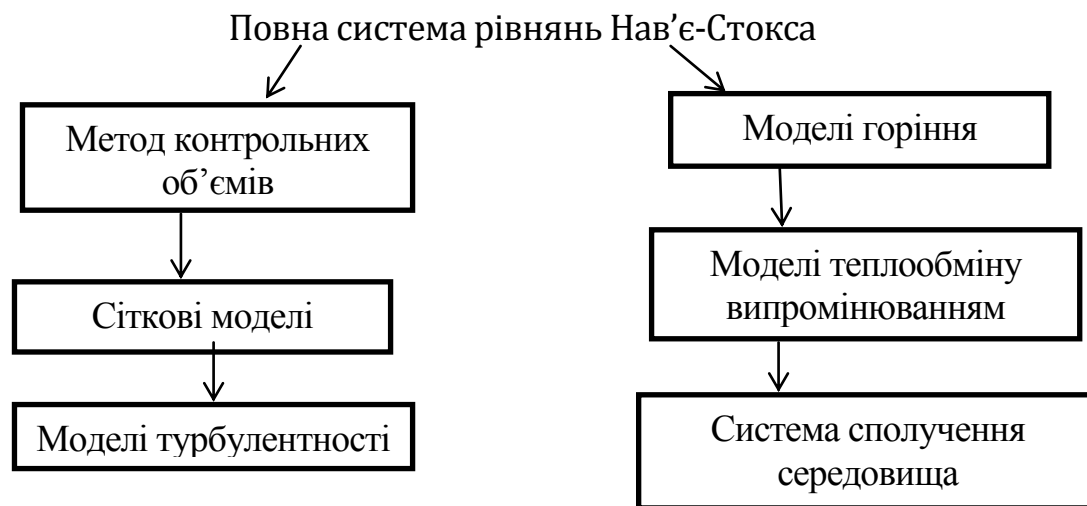


Рисунок 2.1. Теоретична база для розв'язку задач теплообміну у вогневих печах

Для цих цілей використовують фундаментальні рівняння:

- 1) руху потоку (рівняння Нав'є-Стокса);
- 2) нерозривності потоку, яке виражене законом збереження матерії;
- 3) розподілу тепла (рівняння Фур'є-Кіргофа);
- 4) стану газу;
- 5) дифузії, яке виражає зміну концентрації кисню, який реагує, або іншого газового компонента за умови руху газового потоку;
- 6) рівняння, яке виражає закономірність променистого теплообміну у камері печі;
- 7) швидкості перебігу хімічної реакції;
- 8) стехіометричні рівності реакцій;
- 9) руху окремих частинок рідкого й твердого палива з урахуванням гальмівного опору несучого середовища;
- 10) рівність надходження витрат енергії у камері вогневої печі [51].

Система рівнянь Нав'є-Стокса у звичайному вигляді має два рівняння, а саме: рівняння руху та рівняння нерозривності. Ця система детально описана в роботі [51].

Математичні моделі, що існують, їх чисельна реалізація дає змогу ефективно та точно змоделювати процес вогневих випробувань несучих залізобетонних стін на вогнестійкість.

Значення аналізованих функцій у певний момент часу отримаємо унаслідок виконання низки послідовних ітерацій, які детально описано у роботі [51]. Відповідним способом розраховують значення для кожного моменту часу.

Є трудомістким обсяг обчислень для складних конструкцій, тому більш зручно перенести монотонні ітерації в алгоритм для персонального комп'ютера [43-44, 52]. Для розподілу конструкцій на більш дрібні елементи, побудови геометричних моделей конструкцій й розрахунку поведінки елемента та конструкції в цілому існує багато спеціалізованих програм.

Вибір, який саме програмний комплекс обрати, залежить від особливостей процесів, які моделюються, можливостей обчислювальної техніки та користувача. Зміст чисельного експерименту полягає в створенні в середині моделі процесу горіння з контролем температури так, щоб температурний режим нагрівання камери вогневої печі якомога точно збігався з стандартною температурною кривою пожежі.

Отримати вплив теплообміну між камерою печі й термопарою можливо на основі математичного моделювання. Для цього необхідно врахувати, який вплив на вихідні результати має неоднорідний розподіл температур на поверхні досліджуваного фрагменту конструкції та у камері печі. Виокремити технологічні параметри печі та підвищити точність випробувань дає змогу саме математичне моделювання.

Метою моделювання теплового впливу на вертикальні несучі залізобетонні стіни є визначення розподілу температур в будь-який момент часу розвитку чи згасання пожежі, у внутрішніх шарах елемента. Цього можна досягнути, коли бетон вважається однорідним

та неперервним середовищем. За такої умови використовують рівняння теплопровідності Фур'є (2.1) за умови введення певних припущень [53, 54-55].

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad}(T)) \quad (2.1)$$

де CV – об'ємна теплоємність, яка залежить від температури T , Дж/(м³·К);

$\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, який залежить від температури T , Вт/(м·К).

Для залізобетонних конструкцій в умовах пожежі задачі теплопровідності мають деякі характерні особливості. Для їхнього розв'язання необхідно розглянути теплові процеси, що відбуваються у приміщенні під час пожежі, умови теплообміну на поверхні конструкції, що підлягає дослідженню, та теплофізичні параметри у внутрішніх шарах конструкції. Вищезазначені чинники мають складний характер. Відповідно аналітичний розв'язок існує тільки для задач спрощеної умови, що негативно впливає на точність отриманих результатів.

Розрахункові методики, які встановлені нормативними документами [52, 56], рекомендують використовувати стандартну температурну криву пожежі [44, 56-62] для визначення вогнестійкості залізобетонних несучих стін.

Задача із визначення розподілу температур під час пожежі у вертикальних будівельних конструкціях достатньо вивчена. Її розв'язують за допомогою рівняння теплопровідності Фур'є, враховуючи нестационарність нагрівання та нелінійність теплофізичних параметрів. Для розв'язання прямої задачі нестационарної теплопровідності для розрахунку у залізобетонних стінах температурних полів за нелінійної

умови перевагу надають чисельним методам. Необхідно враховувати феноменологію нагрівання бетону, пов'язану з конденсацією, випаровуванням води у порах матеріалу та фільтрацією, в процесі розв'язання задачі теплопровідності, а також витрати теплової енергії в цементному камені на дегідратацію.

2.2. Аналіз основних характеристик програмних комплексів обчислювальної газогідродинаміки

У газогідродинаміці експериментальні й теоретичні методи наукових досліджень існують у тісному взаємозв'язку. Експеримент може бути виконаний або в лабораторії, або у природному середовищі – це так званий натурний експеримент. Але підготовка до експерименту має матеріальні та технічні обмеження. До того ж виконання експериментів – це окреме інженерне завдання, для якого потрібно забезпечити необхідні умови для його виконання, наприклад, спостереження якісної картини явища, вимірювання фізичних величин.

Новий вид експерименту – комп'ютерного або обчислювального (чисельного) – є наслідком розвитку комп'ютерної техніки. Для того, щоб виконати обчислювальний експеримент, необхідні лише відповідне програмне забезпечення та обчислювальні потужності, на відміну від натурального експерименту.

Окрім цього, комп'ютерна програма, на відміну від витратних матеріалів й експериментального устаткування, дозволяє повторне використання і копіювання необмежену кількість разів. Повною заміною натурному експерименту не може стати обчислювальний експеримент, тому що сам потребує верифікації як метод. Отже обчислювальний експеримент відіграє важливу роль у процесах наукових досліджень.

Розвиток чисельних методів стимулював системне застосування комп'ютерної техніки. Чисельні методи були основою обчислювальних технологій та відповідно реалізовувалися у формі комп'ютерних програм. Деякі з таких програм на початковому етапі розроблялися для власних потреб (дослідника або лабораторії), потім поширювалися розробниками на більше коло користувачів, після чого розповсюджувалися. Подальшим розвитком було створення комерційних пакетів програм та безкоштовних пакетів з відкритим кодом – для інженерних і наукових розрахунків.

Суть чисельного експерименту полягає в тому, щоб температурний режим нагрівання термопар якомога точно збігався з стандартною температурною кривою пожежі [63].

Зважати на всі потрібні параметри розрахунків без вказування коефіцієнтів, досліджувати вплив конструктивних та геометричних характеристик печі для випробування залізобетонних конструкцій та виконувати чисельний експеримент дає змогу моделювання теплових процесів в середовищі комп'ютерних систем «CFD».

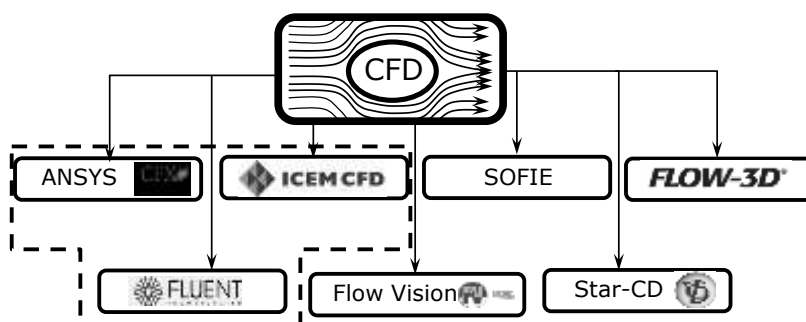


Рисунок 2.2. Сімейство програмних продуктів «CFD», які поширені в Україні

Який саме програмний комплекс використовувати залежить від особливостей модельованих процесів користувача та можливостей обчислювальної техніки. У пункті 2.1. описано потенціал використання

програмних комплексів, які базуються на застосуванні повної системи рівнянь Нав'є-Стокса.

На основі математичного моделювання потрібно отримати вплив теплообміну між термopарою та камерою вогневої печі, врахувати, що саме впливає на результати і має неоднорідний розподіл температури у камері вогневої печі та на поверхні досліджуваного елемента. Завдяки математичному моделюванню маємо можливість виокремити технологічні параметри печі та підвищити точність виконання випробувань.

CFD-програми є важливим інструментом для моделювання течій рідин і газів у різних наукових, інженерних та промислових застосуваннях. Вони дозволяють отримувати інформацію про розподілення тиску, швидкості, температури та інших параметрів, що допомагає в аналізі та оптимізації проєктів.

CFD-програми можуть бути дуже потужними та гнучкими, щоб надавати користувачам можливість моделювати складні фізичні явища та процеси, що взаємодіють. Вони також забезпечують інструменти для візуалізації результатів моделювання, що допомагає зрозуміти та проаналізувати отримані дані.

2.3. Особливості комп'ютерних моделей тепломасообміну у вогневих печах під час виконання випробування з нагрівання несучих залізобетонних будівельних конструкцій

У попередніх розділах обґрунтовано, що сучасне програмне забезпечення, зокрема моделювання теплообміну засобами обчислювальної газогідродинаміки («CFD»), дає змогу враховувати необхідні параметри процесів, що підлягають аналізу, та досліджувати вплив геометричних та конструктивних характеристик вогневої печі для

виконання випробувань залізобетонних конструкцій на адекватність результатів.

Серед проаналізованих програм було обрано дві найбільш прийнятні системи для побудови математичної моделі вогневої печі для дослідження теплового впливу на будівельні конструкції, зокрема несучої стіни, а саме: Fire Dynamics Simulator та FlowVision 2.5.

Програма Fire Dynamics Simulator (далі – FDS) була розроблена Національним інститутом стандартів і технології та є безкоштовним програмним забезпеченням. Авторські права розробників незахищені, програма є загальнодоступним програмним забезпеченням, тому була обрана для моделювання польових моделей саме FDS.

У роботі [64] детально вивчено та зазначено особливості програмного комплексу FDS, який може бути використано для вирішення широкого спектру наукових і прикладних задач тепломасообміну в умовах пожежі, наприклад, для розрахунку вогнестійкості конструкцій, часу блокування шляхів евакуації, часу спрацьовування датчиків, спринклерів тощо. Оскільки модель не вимагає попередніх припущень про структуру потоку, її можна використовувати для моделювання будь-яких об'ємно-планувальних рішень. Така програма не призначена для моделювання вибухів та орієнтована на розрахунок низькошвидкісних потоків. Програма FDS створена для вирішення прикладних задач пожежної безпеки й забезпечення інструментом для вивчення фундаментальних процесів під час пожежі.

Гідродинамічна модель: для низькошвидкісних температурнозалежних потоків FDS чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса, особливу увагу приділяють поширенню диму та теплопередаванню в умовах пожежі. Основним алгоритмом є певна схема другого порядку точності за координатами і часом методу предиктора-коректора. Турбулентність реалізують за допомогою моделі

«Масштабне моделювання вихорів» (LES). Пряме чисельне моделювання (DNS) реалізують, якщо в основі закладена досить точна розрахункова сітка, а масштабне моделювання вихорів – це режим роботи за замовчуванням [65].

Модель горіння: у більшості випадків у FDS застосовують одноступеневу хімічну реакцію, результати якої передаються через двопараметричну модель частки в суміші – це скалярна величина, яка надає масову частку одного чи більше компонентів газу в певній точці потоку [61]. За усталеним налаштуванням розраховують два компоненти суміші: масова частка згорілого та незгорілого палива. Двоступенева хімічна реакція з трипараметричними розкладаннями частки в суміші розкладається на – окислення палива до монооксиду вуглецю і окислення монооксиду до діоксиду. Трикомпонентна хімічна реакція – незгоріле паливо, маса якого завершила перший крок реакції та маса палива, яка завершила другий крок реакції. За допомогою «співвідношення стану» може бути отримана масова концентрація всіх основних реагентів та продуктів. І, нарешті, можна використовувати багатокрокову реакцію з кінцевою швидкістю перебігу.

Перенесення випромінювання: променистий теплообмін доданий до моделі для сірого газу і для деяких обмежених подій за допомогою рішення рівняння переносу випромінювання з використанням широкодіапазонної моделі, яке вирішують за допомогою аналогічного методу скінченних об'ємів для конвективного переносу. Обчислення променистого теплообміну займає приблизно 20 % загального часу за умови використання близько 100 дискретних кутів завантаження центрального процесора, а невелика витрата задана рівнем складності променистого теплообміну.

Геометрія: FDS вирішує основні рівняння на прямокутній сітці, щоб задовольняти сітку, перешкоди повинні бути прямокутними.

Сітка повинна відповідати таким умовам: кожна комірка наближена за формою до куба, кількістю комірок, на стику двох сіток комірки повинні бути вирівняні одна відносно одної. FDS не дозволить запустити розрахунок, якщо ця умова не виконана.

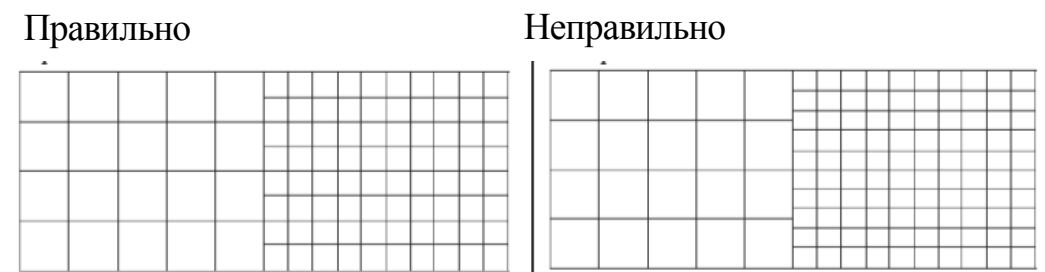


Рисунок 2.3. Правильне та неправильне розташування комірок у сітці

Паралельна обробка даних: використовуючи інтерфейс передавання повідомлень (MPI) розрахунки FDS можна запустити на декількох комп'ютерах.

Граничні умови: задають теплові граничні умови на всіх твердих поверхнях та дані про горючість матеріалу. Тепло- і масоперенесення з поверхні і назад розраховують за допомогою емпіричних співвідношень, хоча у разі виконання прямого чисельного моделювання (DNS) можна обчислити передавання тепла і маси.

Отже, для моделювання пожежі можливо побудувати складну модель швидко і якісно, розглянувши всі основні параметри програми FDS.

Програмна система FlowVision, в якій базовим рівнянням є Нав'є-Стокса, що описує рух рідин та газів у широкому діапазоні чисел Рейнольдса. Також система дає змогу побудувати геометрію об'єкта у спеціалізованих CAD-програмах, уможлиблює легке корегування параметрів печі в процесі розрахунків та має розвинений апарат візуалізації отриманих результатів.

«FlowVision» призначена для розрахунку гідро- та газодинамічних завдань (разом із процесами тепло- та масоперенесення) у широкому діапазоні чисел Маха та Рейнольдса в довільних тривимірних областях [61].

Для замикання рівнянь Нав'є-Стокса (разом із рівнянням нерозривності) використовують додаткові співвідношення, що описують зміну густини та турбулентне перенесення, залежно від конкретного завдання. Набори цих співвідношень називають моделями в сукупності з рівняннями Нав'є-Стокса. У «FlowVision» найбільш розгорнуто представлені нижчезазначені моделі [61]:

- наближення Буссінеска (малі зміни густини) за малих чисел Рейнольдса для описування ламінарної течії в'язкої рідини;

- k-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини за великих чисел Рейнольдса із невеликими змінами густини;

- модель слабо стисливої рідини (в термінології «FlowVision»), яка дає змогу розраховувати стаціонарний дозвуковий рух газу будь-яких змін густини;

- модель повністю стисливої рідини: стаціонарний рух та нестаціонарний за будь-яких чисел Маха.

Програмна система «FlowVision» також допускає використання моделі, яка поєднана з перенесенням речовини й тепла в рідині (газі) – теплоперенесення у твердому тілі.

Крім того, «FlowVision» містить декілька спеціальних моделей, з яких до базової навчальної версії пакета входять лише моделі вільної поверхні, двофазного потоку та одна з моделей горіння.

2.4. Розроблення моделі малогабаритної вогневої установки та перевірка якості її роботи за допомогою програмного комплексу FDS

До вогневих печей висувають особливі вимоги, які полягають у тому, що факел, який використовують в печах, повинен бути на рідкому паливі, щоб полум'я факела обов'язково не торкалося поверхонь елементів конструкцій, які нагріваються. Тобто відстань від факела полум'я повинна бути не менше 0,8 см, якщо норми будуть не дотримані, внаслідок цього може бути інтенсивний вплив факела полум'я на досліджувану конструкцію, та відповідно ми не зможемо отримати достовірні дані щодо встановлення характеристик конструкції, яку досліджують. Відповідно до процесу експерименту, нагрівальна камера вогневої печі повинна забезпечувати рівномірний розподіл температур протягом виконання випробувань у внутрішньому просторі нагрівальної камери, а температура повинна змінюватися за температурним режимом пожежі, відповідно до часу та стандарту [1]. Управління паливною системою не може створити рівномірний розподіл температури в печі для того, щоб забезпечити відповідний стандартний температурний режим пожежі, тому існує певна похибка реалізації режиму нагрівання досліджуваної конструкції [66].

У роботі [67] засобами комп'ютерної газогідродинаміки «FlowVision» були створені та досліджені дві конфігурації вогневих печей з габаритними розмірами: висота 3 000 мм, ширина 3 000 мм, глибина 1 500 та 1 200, а також пальники в кількості 4 та 6 шт. У вищезазначеній роботі продемонстровано результати чисельного моделювання низки комп'ютерних конфігурацій установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції. З результатів цієї роботи стало відомо, що в цьому програмному комплексі також можна побачити нерівномірність розподілення температур під час випробувань на

вогнестійкість на обігрівальній поверхні конструкцій. Аналізуючи попередні розрахунки, висвітлені в роботі [67], можна зазначити, що до актуальних питань належить вдосконалення установок для випробувань на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій, оскільки установки істотно відрізняються геометричною конфігурацією в сучасних вогневих печах, схемами розташування й конструкцією вимірювальної арматури, видом паливно-форсункової системи, економічними параметрами вогневих печей під час експлуатації та побудови камер.

За результатами роботи [68], де виконували моделювання повномасштабних вогневих випробувань, зазначено, що похибка, визначена під час порівняння експериментальних та розрахункових даних, не мала істотних значень. Отже, результати моделювання є адекватними, це дає змогу використовувати такий підхід, а саме: моделювання за допомогою програмних комплексів для прогнозування поведінки будівельних конструкцій в наближених до реальних умов пожежі.

Відповідно до виконаних раніше досліджень [66-69], методи та засоби мають похибки, тому доцільно зробити додаткове дослідження і встановити можливість моделювання тепломасообміну для виявлення ймовірності відтворення умов випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій.

У існуючих наукових роботах не була перевірена можливість моделювання установок для випробування на вогнестійкість будівельних конструкцій у програмному комплексі FDS.

З огляду на це, для виконання досліджень передбачено використання модельної печі, вогневих камер відповідних варіантів, із оглядом двох конфігурацій модельної печі, яка відповідно до

програмного комплексу Fire Dynamics Simulator може бути змодельована з урахуванням основних вимог [1, 6].

Було перевірено можливість моделювання установок для випробування на вогнестійкість будівельних конструкцій в програмному комплексі FDS.

Польові моделі CFD (computational fluid dynamics – англ. обчислювальна гідродинаміка), – це більш універсальний та потужний інструмент, ніж інтегральні та зональні тому, що ґрунтовані на зовсім іншому принципі. Їх переваги детально відображено у [66].

На першому етапі роботи [64] було розроблено алгоритм створення моделі вогневої печі з факельним горінням та розглянуто дві конфігурації вогневих печей для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій.

Геометричні конфігурації печей зображені на рис. 2.4., а габаритні розміри камер зазначені в табл. 2.2.

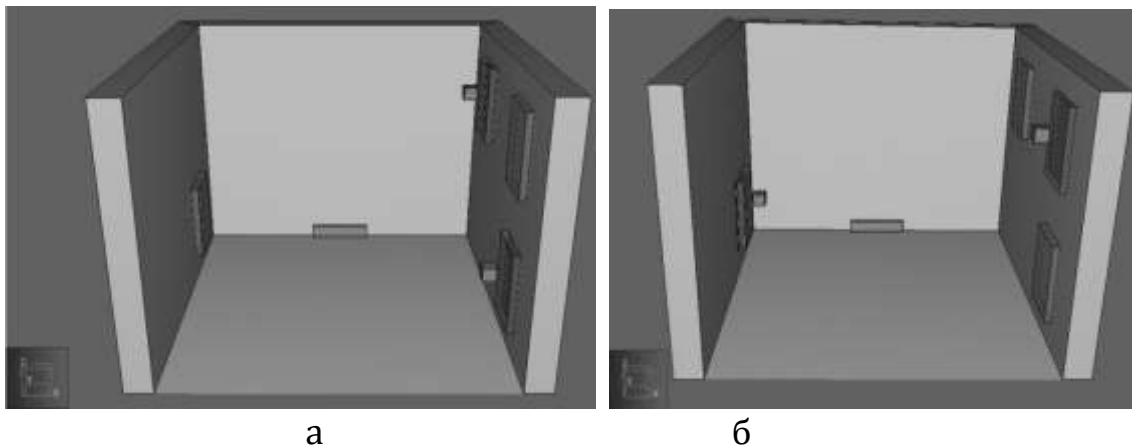


Рисунок 2.4. Конфігурації камер вогневих печей: а – Конфігурація 1 та б – Конфігурація 2

Основні принципи побудови математичної моделі – створення сіткової моделі вогневої печі, що показано на рис. 2.5.

Для створення, за стандартними розмірами, моделей камер вогневих печей необхідно створити сітку, зазначити її границі: висоту, довжину та ширину, а також зазначити кількість комірок по X, Y та Z, їх можна встановлювати самостійно.

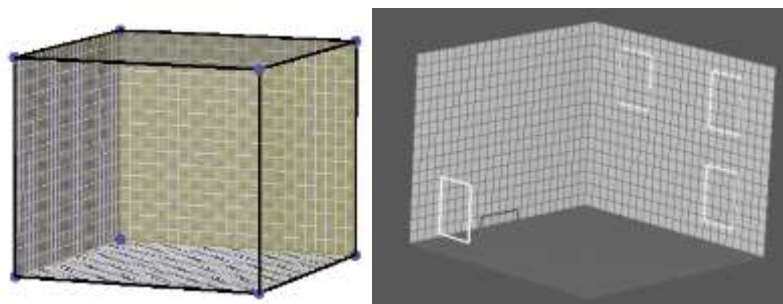


Рисунок 2.5. Сіткова модель розрахункової області вогневих печей конфігурацій 1 та 2

Таблиця 2.2.

Габаритні розміри установки для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій різних конфігурацій

| Назва печі | Розміри камери вогневої, мм | | | Кількість пальників у камері печі | Кількість отворів для відведення продуктів горіння |
|--|-----------------------------|--------|---------|-----------------------------------|--|
| | ширина | висота | глибина | | |
| Випробувальна установка Конфігурації 1 | 1000 | 1000 | 1000 | 2 | 1 |
| Випробувальна установка Конфігурації 2 | 1200 | 1000 | 1200 | 2 | 1 |

Відповідно до габаритів камер вогневих печей було обрано дев'ять термопар, які представлені на рис.2.6. Врахувавши можливості програмного забезпечення FDS, додатково було створено площини, які зможуть графічно висвітлити розподілення температур по площинам відповідно до рис. 2.7.

Цей програмний комплекс дає змогу працювати як в текстовому режимі так і в 2D та 3D.

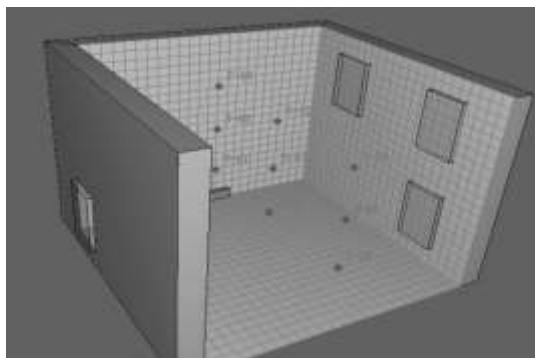


Рисунок 2.6. Розташування термопар в 3D моделях конфігурацій вогневих печей

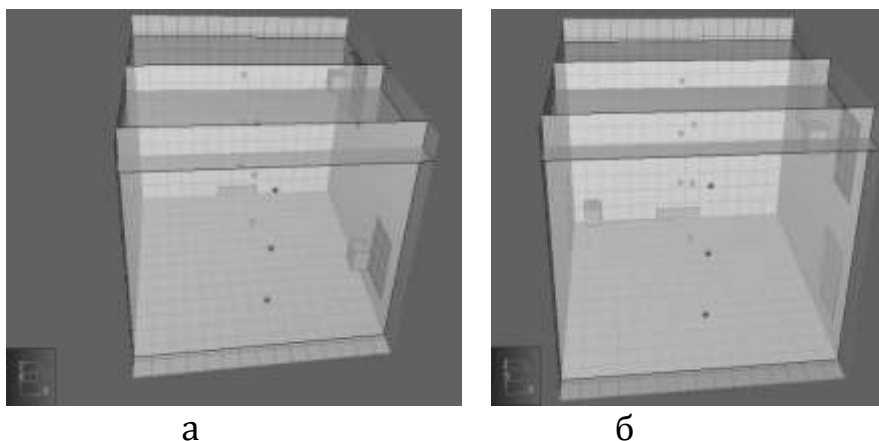


Рисунок 2.7. Розташування в 3D моделях конфігурацій вогневих печей температурних площин: *а* – Конфігурація 1; *б* – Конфігурація 2

Наступним етапом було проаналізовано на 60-ій хвилині моделювання розподіл температур по поверхні конструкції.

На рис. 2.8. відображено розподіл температур по площині (див. рис. 2.7.) біля поверхонь конструкцій вогневої печі досліджуваного фрагмента несучої стіни, біля форсунок та виходів продуктів горіння у кожній з конфігурацій на 10-ій та 60-ій хвилині випробувань.

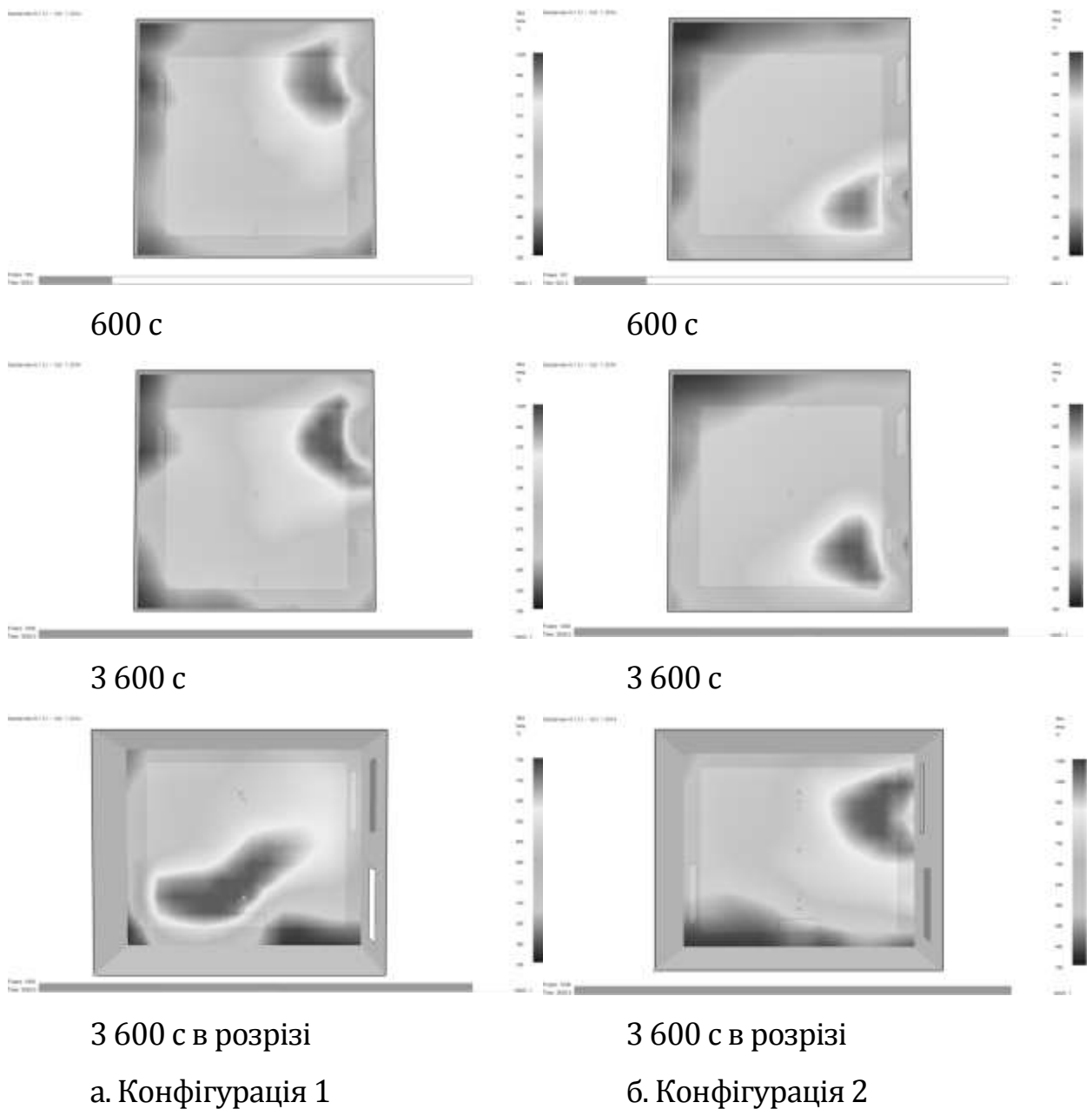
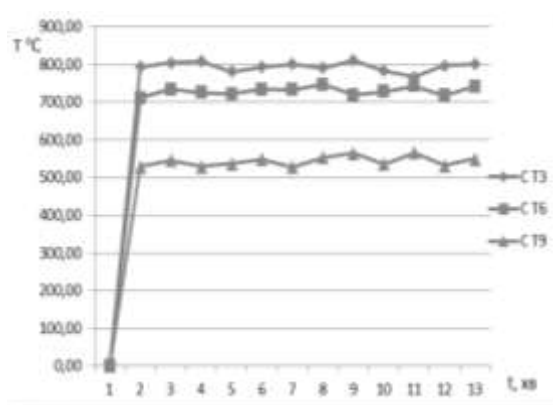


Рисунок 2.8. Розподіл температур в змодельованих камерах вогневих печей по площинам

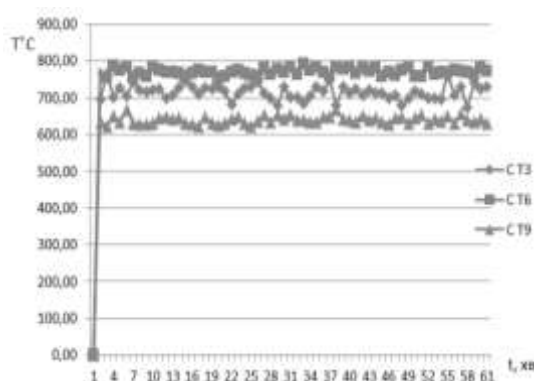
Основними недоліками «Конфігурації 1» (рис. 2.4., а) порівняно з іншими конфігураціями є невеликий розмір печі, недосконале розташування отворів для відведення продуктів горіння та розташування форсунок. Тому фрагмент конструкції прогрівається нерівномірно. Конструкція прогрівається слабше над отворами для видалення продуктів горіння та у лівій крайній частині камери вогневої печі.

Змінивши параметри внутрішнього простору камери печі «Конфігурації 2» (рис. 2.4., б) та змінивши розміщення 2-ох пальників, температура рівномірно розподілилась по обігрівальній поверхні фрагмента (рис. 2.4., б). Відбувся більш характерний розподіл температур по вертикалі внаслідок правильного розміщення отворів для відведення продуктів горіння, біля яких конвективні потоки були направлені у бік означених отворів, а температура рівномірно розподілилася саме по поверхні фрагмента.

Відповідно до розрахунків було визначено температуру на дев'яти встановлених термодарах в печі, які зображені на рисунку 2.9.



а



б

Рисунок 2.9. Графіки датчиків контролю температури Т3, Т6, Т9 в камері вогневої печі під час обчислювального експерименту: а – Конфігурація 1, б – Конфігурація 2

Відповідно до створених моделей печей з різними конфігураціями, було отримано наступні дані термопар, які представлені на рис. 2.6., які свідчать про те, що розподіл температур по всій площі печі є рівномірний. Оскільки неможливо змінити початкові дані подавання газу для нагрівання камери та малі габарити печі, максимальна температура у верхній частині камер вогневих печей була досягнута вже на 3-ій хвилині в Конфігурації 1 – 810 °С, а в Конфігурації 2 – 790 °С та відповідно у нижній частині 520 °С і 620 °С. У горизонтальних площинах абсолютне відхилення температури не перевищило 30 °С, проте не відповідає стандартному, температурний режим, що створюється в печі [1, 64].

На основі отриманих даних можемо зробити наступні висновки.

Вдосконалення методів та засобів оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних стін належить до актуальних питань, оскільки, як за розрахункових, так і за експериментальних методів існують похибки.

1. Для моделювання тепломасообміну у камерах вогневих печей, можливості програмного комплексу FDS та його математичний апарат дозволяють створити установки із факельним горінням.

2. Описано алгоритм створення моделі вогневої печі з факельним горінням у вищезазначеному програмному комплексі. Показано особливості створення геометричної та сіткової моделей. Було обрано дві конфігурації вогневих печей, які відрізнялись геометричними характеристиками для виконання обчислювальних експериментів.

3. Відповідно до виконаних обчислювальних експериментів з моделювання тепломасообміну по всій площі печі відбувається рівномірний розподіл температур, максимальна досягнута температура в конфігурації була 810 °С, а в 2-ій конфігурації – 790 °С. Розбіжність температур у різних площинах не перевищувала 30 °С.

4. Проаналізувавши отримані результати, можна стверджувати, що в них існують суттєві недоліки. Коригувати інтенсивність горіння факелів

полум'я в процесі розрахунку неможливо, що є особливістю такого програмного комплексу. Необхідні дані закладено у препроцесор, задано час розрахунку, а далі відбувається інтенсивне прогрівання камери вогневої печі, тому що FDS працює автономно та не дозволяє відтворити стандартний температурний режим у камері вогневої печі. Стаціонарна температура досягається вже через одну хвилину та тримається протягом часу розрахунку.

5. За результатами виконаної роботи та вищеописаних у пункті 2.4. недоліків бачимо, що програмний комплекс FDS має обмеження, що зумовлює визначення лише рівномірності прогрівання обігрівальної поверхні конструкції та камери вогневої печі.

2.5. Розроблення моделі малогабаритної вогневої установки та перевірка якості її роботи за допомогою програмного комплексу FlowVision

Основним завданням є гарантування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій та пожежної безпеки під час їх проєктування, яка повинна відповідати вимогам норм пожежної безпеки сьогодення. Зазвичай у спеціальних випробувальних установках межі вогнестійкості будівельних конструкцій досліджують виконанням вогневих випробувань за стандартним методом. Але є досконаліми самі конструкції та сукупність правил, методів та певних норм, які призначені для забезпечення достовірності вимірювань, тому їх необхідно поліпшувати. Для вирішення цього питання потрібно виконувати додатково досліди з використання установок для виконання вогневих випробувань. Але висока вартість таких випробувань та велика трудомісткість за допомогою програмних комплексів спонукає моделювати тепломасообмін у камерах вогневих печей. Також фактом є

те, що існуючі методи стандартизуються лише на температурно-часових кривих датчиків контролю температури камери вогневої печі. Тому від конструктивних елементів та геометричних параметрів камери вогневої печі залежить рівномірність прогрівання залізобетонної будівельної конструкції. У цій роботі показано, як геометричні параметри, розміщення отвору для видалення продуктів горіння, отворів для встановлення пальників та внутрішньої будови камери печі залежить рівномірність розподілення температури по обігрівальній поверхні вертикальних будівельних конструкцій [70].

У попередніх дослідженнях [71] за допомогою системи автоматизованого проектування було змодельовано низку конфігурацій та встановлено 3 з них, які найбільш адекватно працюють, їх можливо використовувати в FlowVision та FDS. З використанням створених конфігурацій у SolidWorks, у вище зазначених програмних комплексах FlowVision та FDS, можливо перевірити розподіл температур по обігрівальній поверхні та всій площі печі.

Розглянувши роботу [69] стало відомо, що за допомогою програмного комплексу CFD FlowVision, на основі повної системи рівнянь Нав'є-Стокса рис. 2.5., дають недостовірні результати обчислювальних експериментів створені математичні моделі вертикальних вогневих печей для випробувань залізобетонних стін на вогнестійкість з різними геометричними параметрами та кількістю пальників. У верхній частині камери вогневої печі температура перевищує допустиму похибку випробувань, а в нижній – потрібна температура у необхідний проміжок часу не досягається. У камерах вогневих печей температура розподіляється нерівномірно.

Аналізуючи висвітлені у роботах [72, 73] попередні математичні моделі можна зазначити, що для виконання випробувань на вогнестійкість несучих залізобетонних стін камери вогневих печей

потрібно поліпшувати, оскільки вогневі печі істотно відрізняються конструкцією вимірювальної арматури, схемами розташування отворів для пальників та їхньою кількістю, видом паливно-форсункової системи та геометричною конфігурацією. Тобто питання ефективності моделювання умов нагрівання залізобетонних будівельних конструкцій залишається актуальним відповідно до умов стандартного температурного режиму.

Відповідно до попередніх досліджень [69–73] мають недосконалість та деякі похибки створені різні конфігурації камер вогневих печей, тому для виконання більш достовірних досліджень теплового впливу пожежі на залізобетонну будівельну конструкцію доцільно визначити конфігурацію камери вогневої печі, яка здатна відтворювати температурний режим пожежі та виконати обчислювальний експеримент, щоб перевірити, чи коректно працює вогнева піч.

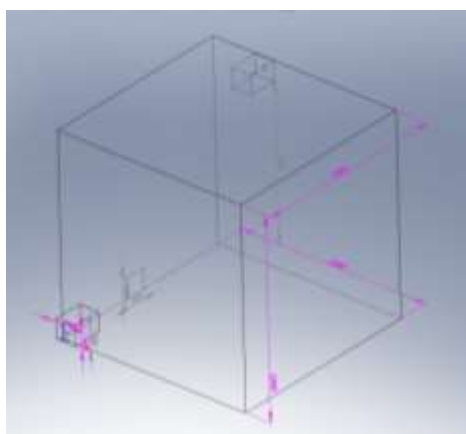
З огляду на це, щоб виконати реальні вогневі випробування, передбачено створення запроєктованої камери вогневої печі, що здатна забезпечувати рівномірне температурне розподілення на обігрівальній поверхні та у камері вогневої печі будівельних конструкцій.

Для дослідження теплового впливу пожежі на обігрівальну поверхню несучих стін було змодельовано 3 комп'ютерні конфігурації, які будуть відтворювати умови нагрівання несучих залізобетонних стін за стандартним температурним режимом пожежі.

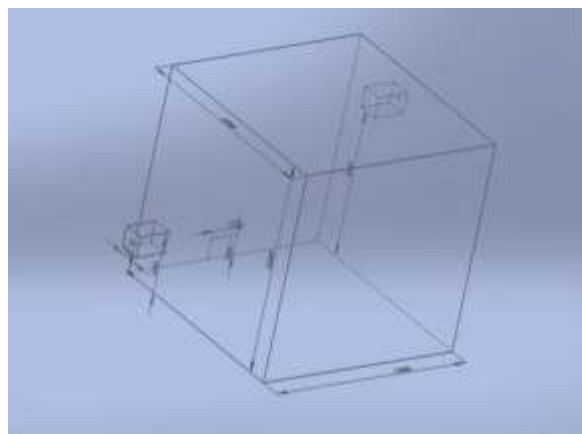
У попередній роботі [71] системою автоматизованого проектування було спроектовано три конфігурації камер вогневих печей з різними габаритами самої вогневої печі, отворами для встановлення пальників та отвором для видалення продуктів горіння. За допомогою кольорів у SolidWorks умовно було розмежовано елементи конструкції печі, які будуть випробовувати.

Геометричні конфігурації вогневих печей зображені на рис. 2.10., а габаритні розміри камер зазначені в табл. 2.3.

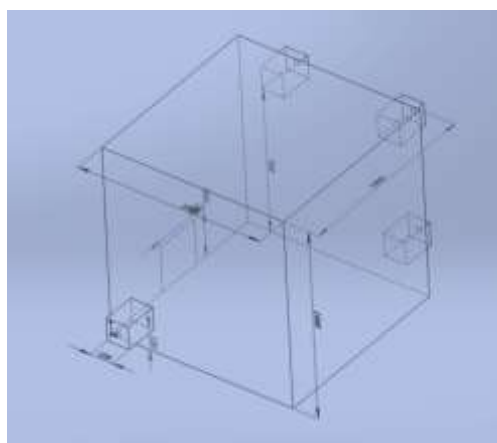
На рис. 2.10. показано геометричні параметри створених конфігурацій камер печей для дослідження теплового впливу пожежі на обігрівальну поверхню несучих залізобетонних стін.



Конфігурація А – *a*



Конфігурація Б - *б*



Конфігурація В - *в*

Рисунок 2.10. Геометричні параметри конфігурацій камер печей для дослідження умов нагрівання несучих залізобетонних стін за стандартним температурним режимом пожежі: *a* – конфігурація «А», *б* – конфігурація «Б», *в* – конфігурація «В»

У конфігурації «А» (рис. 2.10., *a*) габаритні розміри камери вогневої печі – 1 200 мм×1 200 мм, кількість отворів для встановлення пальників – 2, отвір для відведення продуктів горіння розмірами 125 мм×100 мм.

У конфігурації «Б» (рис. 2.10., б) змінено розміри та розташування отворів для пальників, а отвір для видалення продуктів горіння та габаритні розміри камери вогневої печі залишено.

Конфігурація «В» (рис. 2.10., в) створена з мінімально можливим розміром камери печі та забезпечує вимоги [1], а саме не менше 0,8 м глибина вогневого простору печі. Збільшено кількість отворів для встановлення пальників, отвір для відведення продуктів горіння, що дає змогу досліджувати основні види залізобетонних будівельних конструкцій, таких, як плита, стіна, балка чи колона. У цій роботі [71] досліджено тепловий вплив пожежі на обігрівальну поверхню несучої стіни, тому використовують тільки 2 отвори для встановлення пальників.

Таблиця 2.3.

Габаритні розміри конфігурацій камер печей для дослідження теплового впливу пожежі на обігрівальну поверхню залізобетонних будівельних конструкцій

| Назва камери печі | Розміри камери печі, мм | | | Кількість пальників в у камері печі | Кількість отворів для відведення продуктів горіння | Кількість отворів для встановлення пальників |
|----------------------------------|-------------------------|--------|---------|-------------------------------------|--|--|
| | ширина | висота | глибина | | | |
| Випробувальна піч Конфігурації А | 1200 | 1200 | 1200 | 2 | 1 | 2 |
| Випробувальна піч Конфігурації Б | 1200 | 1200 | 1200 | 2 | 1 | 2 |
| Випробувальна піч Конфігурації В | 1000 | 1000 | 1000 | 2 | 1 | 4 |

Загальний вигляд сіткової та математичної моделі камери вогневої печі зображено на рис. 2.11.

Створення сіткової моделі печі є одним із основних принципів побудови математичної моделі, для їх побудови за встановленими розмірами необхідно зазначити кількість комірок та створити сітку по X, Y та Z.

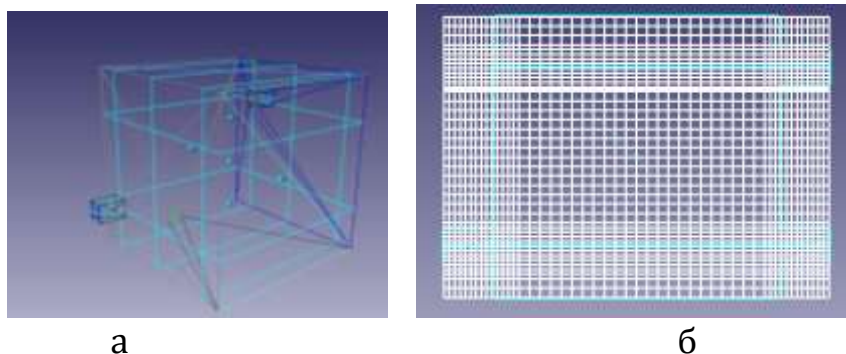


Рисунок 2.11. Загальний вигляд математичної моделі камери печі – а; сіткова модель розрахункової області конфігурацій камер вогневих печей – б

Відповідно до габаритів камери печі для вимірювання температури та вимог [1] встановлено відповідну кількість датчиків контролю температури у камері печі та на обігрівальній поверхні, які представлені на рис. 2.12. Для наочності, з урахуванням можливостей програмного комплексу FlowVision, додатково були створені площини, які графічно, по площинам, відображають розподіл температур, рис. 2.13.

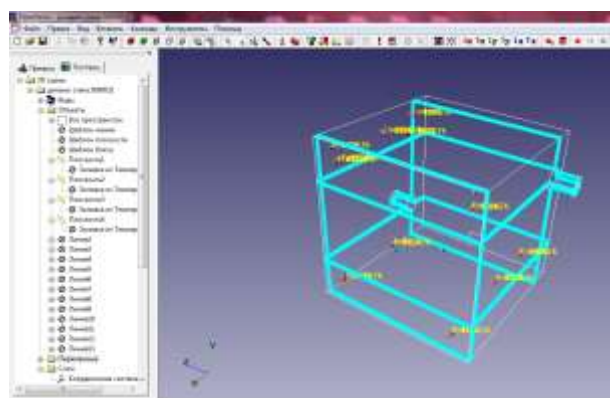


Рисунок 2.12. Розташування в конфігурації «Б» датчиків контролю температури у камері вогневої печі

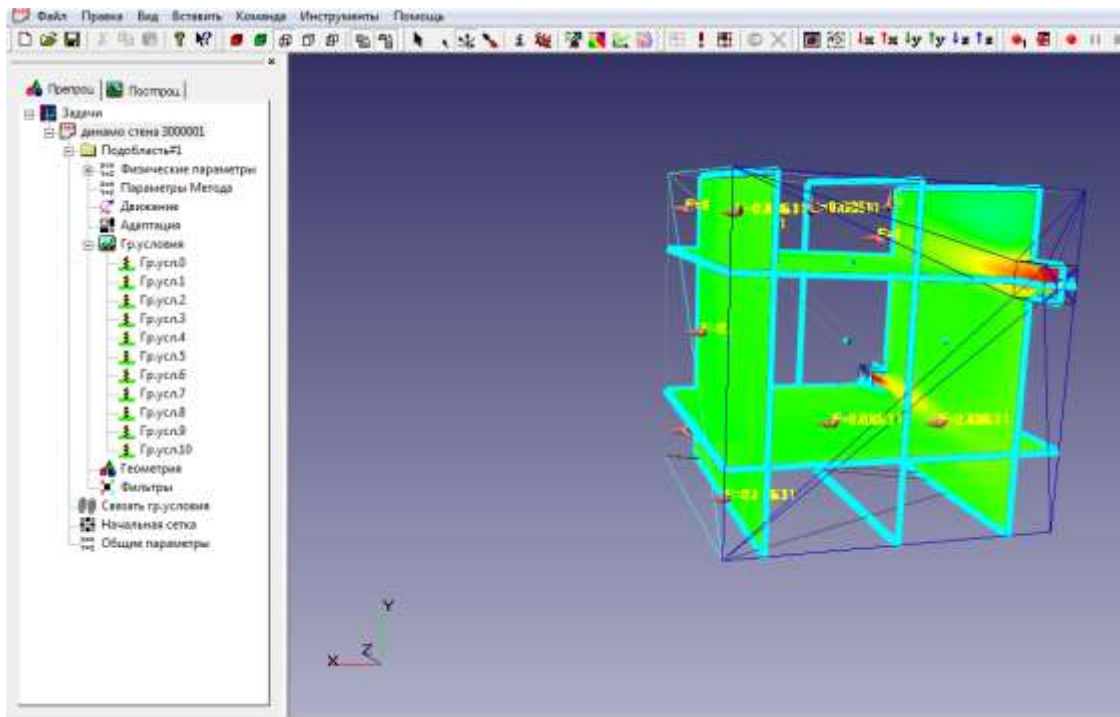
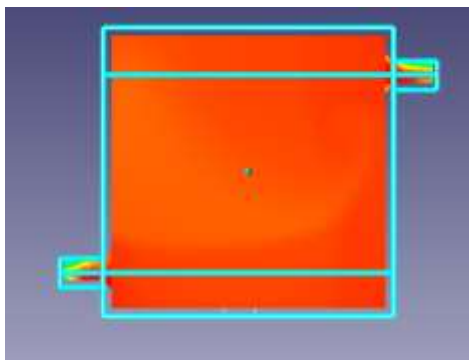
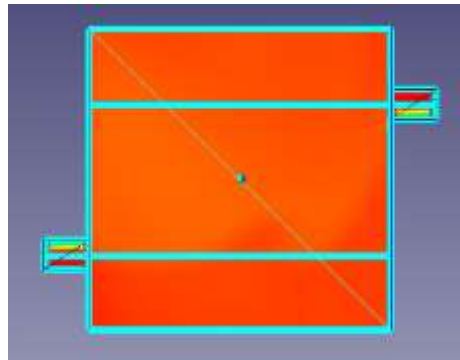


Рисунок 2.13. Конфігурація «Б», розташування температурних площин у камері вогневої печі

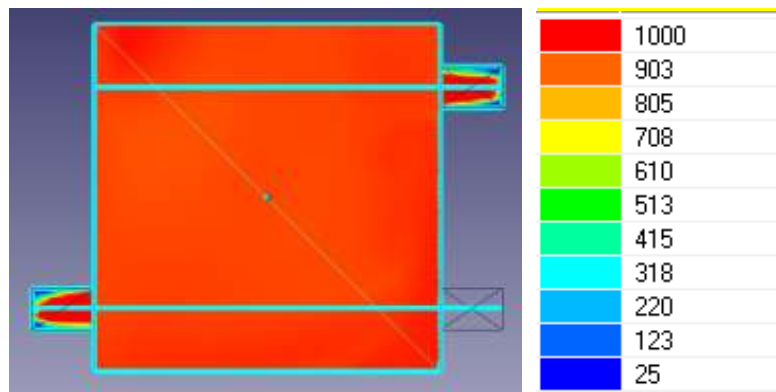
На рис. 2.14 заливкою кольорів (градієнт температур) відображено розподілення температур по поверхні конструкцій у кожній із змодельованих конфігурацій на 60-ій хвилині випробувань.



Конфігурація А – а



Конфігурація Б – б



Конфігурація В – в

Рисунок 2.14. Градієнт температур змодельованих конструкцій у кожній з конфігурацій на обігрівальній поверхні: *а* – Конфігурація «А», *б* – Конфігурація «Б», *в* – Конфігурація «В», *г* – відповідно до кольору температурні межі °С

З проведених досліджень можна зробити висновок, що основними недоліками конфігурації «А» (рис. 2.10., *а*, рис. 2.15., *а*) порівняно з іншими конфігураціями вогневої печі габарити камери вогневої печі, отвір для відведення продуктів горіння, розмір та розташування отворів для пальників є недосконалими.

У результаті внесення корективи до конфігурації «А», температура у конфігурації «Б» (рис. 2.10., *б*) розподілилась по обігрівальній поверхні несучої стіни більш рівномірно (рис. 2.15., *б*), але існують місця, де конструкція прогрівається більш сильно.

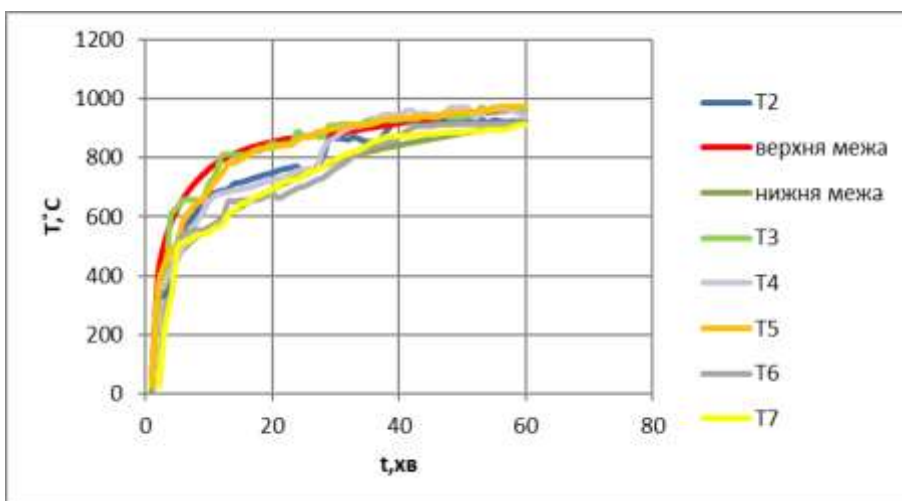
У конфігурації «В» (рис. 2.10., *в*) у результаті збільшення отвору для відведення продуктів горіння і зменшення простору камери печі, отримано найбільш рівномірне розподілення температур (рис. 2.15., *в*) порівняно з конфігураціями «Б» та «А».

Варто зазначити, що в реальних випробуваннях у камері вогневої печі, за умови однакових габаритів, витрачається менше палива для прогрівання камери вогневої печі, а також навколишнє середовище забруднюється менше, вона прогрівається швидше, зменшуються праце-

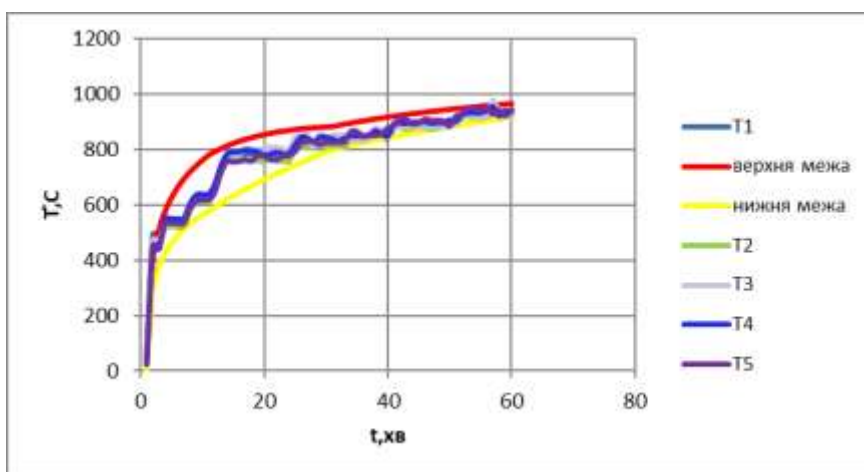
та фінансові витрати. Також ця вогнева піч забезпечує температурний режим пожежі, який відповідає стандартному.

Як видно з рис. 2.15. у всіх конфігураціях можна спостерігати коливання температури, але вони незначні. Всі створені конфігурації камер печей відповідають вимогам [1], відповідно до отриманих результатів, лише конфігурація «В» здатна створити відповідний температурний режим.

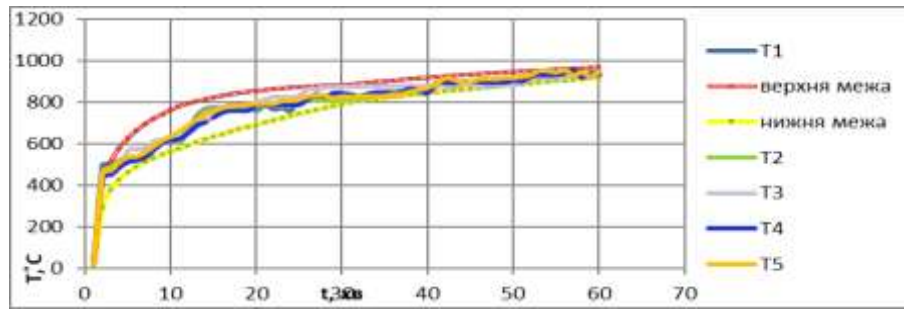
Відповідно до виконаного дослідження було розраховано температуру у камері печі та на обігрівальній поверхні несучої залізобетонної стіни, відповідно до отриманих даних датчиків контролю температури, результати представлені на рис. 2.16. у вигляді графіка.



а



б



В

Рисунок 2.15. Дані термопар, які встановлені на обігрівальній поверхні несучої залізобетонної стіни: а – Конфігурація А, б – Конфігурація Б, в – Конфігурація В

Відповідно до отриманих даних термопар, які встановлені на обігрівальній поверхні несучої залізобетонної стіни, можна констатувати наступне:

- максимальна температура на обігрівальній поверхні несучої залізобетонної стіни на 9-ій хвилині досягла 658 °С, а середня температура в цей момент часу становила 620 °С і була стабільною впродовж 15 хвилин;

- було збільшено подавання палива з 27 хвилини від початку дослідження, внаслідок цього середнє значення температури зросло майже до 935 °С і до закінчення обчислювального експерименту було стабільним;

- змодельоване дослідження засобами комп'ютерної газогідродинаміки температурного впливу пожежі на обігрівальну поверхню несучої залізобетонної стіни та зростання температур у камері вогневої печі відповідало стандартній температурній кривій пожежі [71].

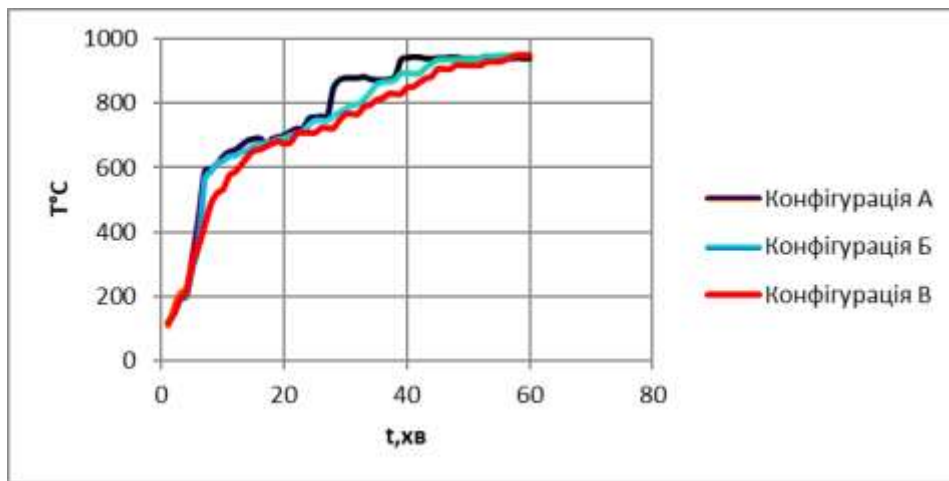


Рисунок 2.16. Середня температура по всім місцям контролю температури у камері печі

Було отримано наступні дані термопар відповідно до виконаного дослідження, які представлені на рис. 2.15.-2.16. Рівномірний розподіл температур відбувається по всій обігрівальній поверхні несучої залізобетонної стіни та площі печі. Завдяки можливості змінювати початкові дані та відповідні габарити камери вогневої печі подавання газу для нагрівання камери та подавання повітря, температурний режим, що створюється в печі, відповідає стандартному [1].

Виконане дослідження демонструє здатність забезпечувати рівномірне розподілення температур на обігрівальній поверхні несучої залізобетонної стіни та у камері вогневої печі за допомогою програмного комплексу FlowVision, та результати чисельного моделювання трьох конфігурацій камер вогневих печей з різними параметрами.

1. Математичний апарат програмного комплексу FlowVision забезпечує відтворення необхідного температурного режиму пожежі, якість прогрівання внутрішнього простору камери печі та дозволяє виконувати дослідження теплового впливу пожежі на обігрівальній поверхні залізобетонних будівельних конструкцій.

2. Досліджено камери печей розміром 1 м 20 см×1 м 20 см×1 м 20 см – Конфігурація «А» та «Б», встановлено, що камера печі конфігурація «В»

1м×1м×1м – здатна забезпечити стандартний температурний режим пожежі.

3. На обігрівальній поверхні несучої залізобетонної стіни конфігурації «В» на 9-ту хвилину максимальна температура досягла 658 °С, а середня температура в цей момент часу становила 620 °С.

4. Відповідно до виконаного відбувається рівномірний розподіл температур по всій площі у камері печі конфігурації «В», а максимальна температура в камері вогневої печі досягнула 951 °С.

2.6. Розроблення концепту удосконаленої малогабаритної вогневої установки та описування її можливих параметрів

У попередніх пунктах 2.4. -2.5. було досліджено та обрано за основу камеру вогневої печі, яка здатна забезпечити стандартний температурний режим пожежі, встановлено її габарити, параметри отвору для відведення продуктів горіння та отвори для пальників, їхнє розташування та розміри.

На основі виконаного дослідження існує необхідність створити ескіз малогабаритної вогневої установки.

На рис. 2.17.-2.18. продемонстровані основні конструкторські рішення.

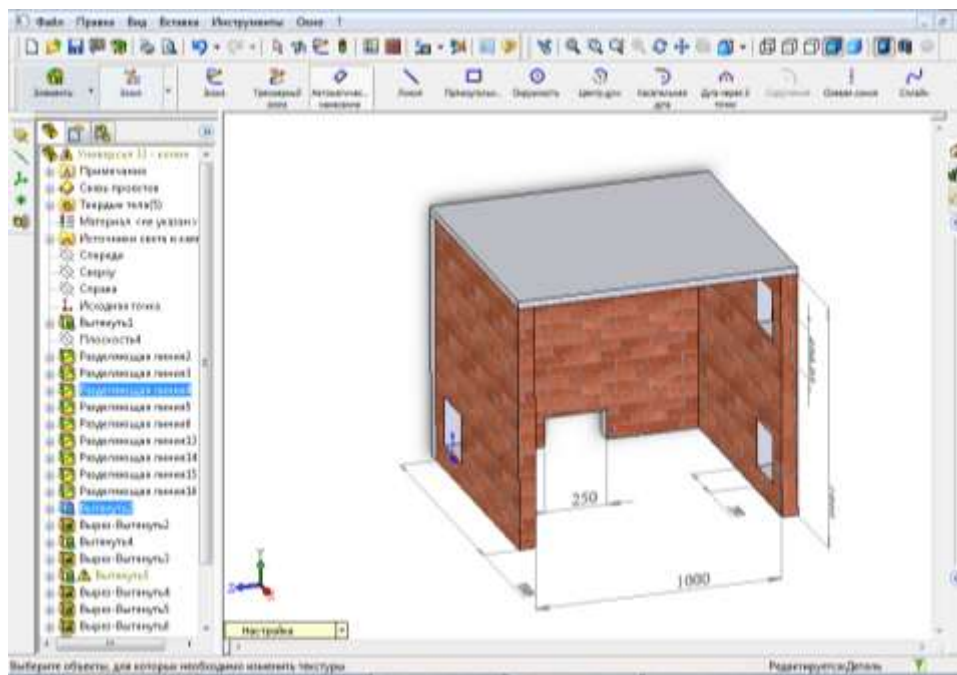
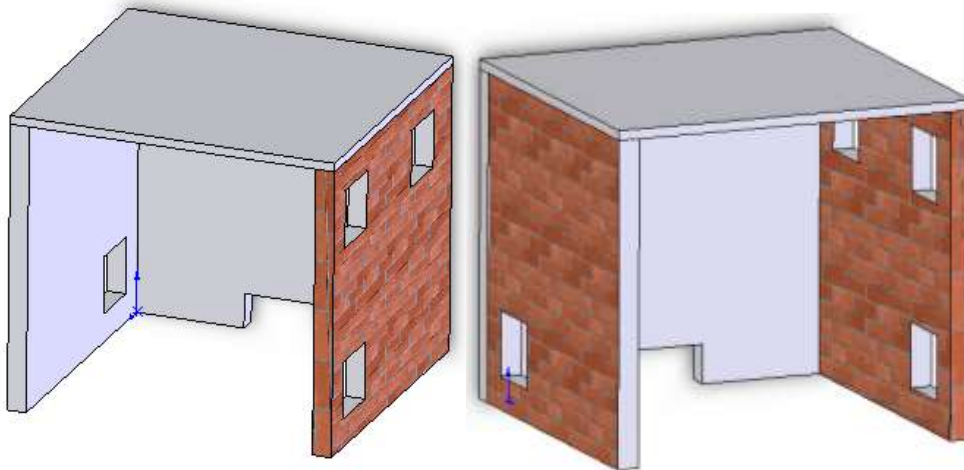


Рисунок 2.17. Ескіз камери вогневої печі

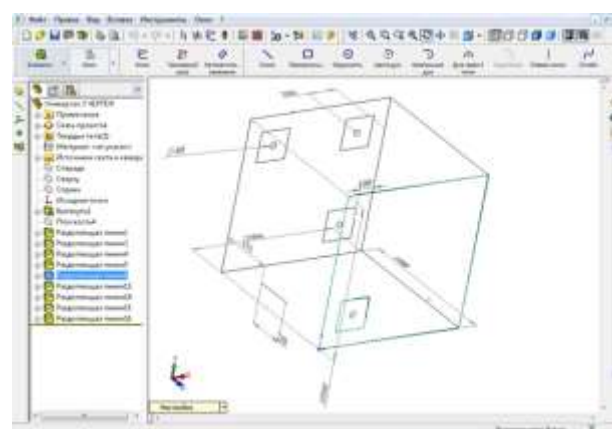


Рисунок 2.18. 3-D вигляд камери печі запроектованої установки із зазначеними розмірами (мм)

Згідно з нормами [1] мінімальна висота і ширина вертикальної будівельної конструкції – 3 000 мм відповідно до мінімальної висоти і ширини камери вогневої печі. Глибина внутрішнього простору печі повинна бути не менше за 0,8 м. Товщина футеровки печі повинна бути не меншою за 50 мм, а матеріал, з якого вона створена, повинен забезпечувати достатню термоізоляцію камери. Відповідно до раніше змодельованої камери вогневої печі розроблено ескіз прототипу вогневої печі розміром 1,5 м×1,5 м× 1,2 м, внутрішній простір камери кубічної форми зі стороною, що дорівнює 1 м, це забезпечує мінімальну необхідну відстань від факела полум'я.

Місце розташування печі – навчальний комплекс практичної підготовки фахівців оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (с. Свидівок, Черкаського району, Черкаської області).

Для будівництва вогневої печі необхідно обрати вогнетривку цеглу, яка не руйнується під впливом високих температур. Було проаналізовано види шамотної цегли, яка має пористу поверхню, її виготовляють на основі шамотного порошку, порошоків коксу та графіту, а також зерен кварцу. Цей виріб здатний акумулювати та віддавати тепло.

Шамотна цегла має температуру початку деформації 1 300 °С, максимальна вогнетривкість: 1 690-1 730 °С (залежно від вмісту алюміній оксиду). Жароміцність вогнетривкої цегли забезпечена алюміній оксидом. Ця хімічна сполука надає цеглі пористості та за рахунок цього робить цеглу хорошим провідником тепла. Чим більше пор в структурі цегли, тим довше вона нагрівається та охолоняє.

Найбільш популярними є марки шамотної цегли ША-5 та ША-8.

Для мурування такою цеглою використовують спеціальний вогнетривкий розчин на основі жароміцної глини – «мертель».

У випадку частого будівництва застосовують цеглу марок ША та ШБ. Вона найкраще за інших підійде для будівництва печей та камінів. Серед найбільш популярних марок цегла ША-5 має показник вогнетривкості від +1 690 °С. Шамотна цегла ША-8 за такого ж показника пористості має аналогічний бар'єр в +1 650 °С.

Проаналізувавши види шамотної цегли, було обрано шамотну цеглу із нижчезазначеними характеристиками: табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Характеристики шамотної цегли, яку буде використано у будівництві камери вогневої печі

| Опис продукту | Параметри | Одиниці виміру |
|---|---------------------|----------------------------|
| Сировинна база | Андалузит | |
| Хімічний аналіз | | |
| Al ₂ O ₃ | 59-63 | (масова частка %) |
| SiO ₂ | 34-38 | (масова частка %) |
| Fe ₂ O ₃ | 1,0 | (масова частка %) |
| Фізичні властивості | | |
| Щільність, що здається | 2,60-2,75 | (г/см ³) |
| Відкрита пористість | 11-14 | (% об.) |
| Межа міцності у разі стискання вогнетривкості під навантаженням | 70 | (Н/мм ²) |
| t (початкова) | 1700 | (°С) |
| t (кінцева) | >1700 | (°С) |
| Конус Зегера (піроскоп) | 40 | |
| Стійкість до змін температури t | 100 | (циклів), (950 °С/повітря) |
| | Термічне розширення | Теплопередача |
| °С | (%) | (Вт/м*К) |

| | | |
|------|-----|-----|
| 300 | 0,1 | 1,7 |
| 700 | 0,4 | 1,7 |
| 1000 | 0,7 | 1,6 |
| 1200 | 0,9 | 1,6 |

Отвори для пальників у кількості 4 шт., 1 розташований у нижньому положенні з лівої сторони та 3 отвори з правої сторони п-подібного огороження печі, 2 з яких у нижньому положенні камери печі. Під час дослідження теплового впливу пожежі на залізобетонну конструкцію, а саме стіну, використовують тільки 2 отвори, інші два отвори закупорюють мінеральною ватою. Залежно від виду будівельної конструкції місце розташування пальників можливо змінювати.

Для відведення димових газів з робочого простору та видалення їх за межі печі є устаткування для створення тяги, яка може бути природньою за рахунок встановленого димаря або примусовою, яка створюється за допомогою вентиляторів, інжекторів або димососів.

Отвір для відведення продуктів горіння розміром 125 мм×100 мм.

Димохід камери вогневої печі має дві частини: цегла в один ряд та вбудована сталева труба з товстостінного металу 10 мм та діаметром 20 см, яка витримує до 1 000 °С та легка для монтажу. Ця труба врізається у витяжну систему побудованої поруч будівлі.

Ескіз вогневої установки містить: 2 з'ємні панелі розміром 1,2 м×1,2 м, які складаються з металевого каркасу, який заповнений мінеральною ватою, та двох магнезитових листів з обох сторін панелі.

Металевий каркас складається зі з'ємних панелей з чорного металу, який містить залізо та сплави на його основі. Такі метали є щільними, мають високу температуру плавлення та високу твердість.

Важливою характеристикою мінеральної вати є її вогнестійкість. Волокна, які виготовлені з натуральних гірських порід, під дією температури в 1 000 °С починають плавитися тільки через 2 години.

Мінеральну вату використовують жорстку – застосовується для теплоізоляції контурів конструкцій, яка легко витримує помірні навантаження та виготовлена у вигляді плит зі щільністю 90 кг/куб. м.

Проаналізувавши характеристики низки різних магнезитових плит див. табл. 2.3., які на момент створення ескіза та будівництва вогневої установки були на ринку, серед нижчезазначених обрали ту, чії характеристики задовольняли наші вимоги.

Таблиця 2.5.

Характеристики магнезитових плит

| | | | |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Довжина, мм | 2 400/1 200 | 2 400/1 200 | 2 400 |
| Ширина, мм | 1 200/600 | 1 200/600 | 1 200 |
| Товщина, мм | 8, 10, 12 | 8, 10, 12 | 10, 12 |
| Щільність, кг/м ³ , в межах | 750...850 | 900...1000 | 1000...1200 |
| Міцність на згин, МПа, не менше | 5,5 | 7,5 | 7,5 |
| Температура °С | 1 200 °С, тривалістю до двох годин | 1 200 °С, тривалістю до двох годин | 1 200 °С, тривалістю до двох годин |

Відповідно до [1] температурний режим у печі повинен забезпечуватись спалюванням рідкого палива.

Відповідно до [74] піч для випробування має бути розрахована на споживання рідкого або газоподібного пального.

Горіння газоподібного палива належить до типу гомогенних реакцій. Для підтримання процесу горіння необхідна постійна присутність кисню та горючих речовин. Для цієї мети та для утворення суміші газу з окисником, у випадку з газоподібним паливом, використовують газопальники різноманітних конструкцій [75].

У роботах [76-77] зазначено, що для процесу горіння необхідно, щоб відбулася хімічна реакція окислення горючих складових за рахунок того,

що горючий газ буде змішаний з повітрям. Повний час згорання палива у загальному випадку має дві частини: часу перебігу хімічної реакції та часу, протягом якого досягається контакт окисника з горючою речовиною. За принципом спалювання газу всі пальники ділять на три групи рис. 2.22.

Дифузійний принцип спалювання рис. 2.19., а: спалювання відбувається без попереднього змішування повітря з газом. У цьому випадку на потрапляння окисника до горючої речовини витрачається часу набагато більше, ніж часу на перебіг хімічної реакції.

Час перебігу процесу визначається часом сумішоутворення і відбувається в дифузійній області горіння. За умови розділеного подавання в робочий простір горючого газу і повітря за рахунок взаємної дифузії відбувається їхнє змішування. Зазвичай спалювання палива за дифузійним принципом застосовують у високотемпературних печах з температурою 1 100...1 200 °С.

За таких температур час підведення кисню до пального значно більший часу для здійснення самої реакції горіння, а швидкість хімічних реакцій велика. Тому швидкість перемішування палива і повітря є визначним чинником горіння, а факел обмежено поверхнею, на якій закінчується підмішування повітря з паливом до стехіометричного співвідношення складу суміші. Довжину полум'я визначає собою точка, в якій ця поверхня перетинає вісь струменя.

Процес змішування палива і повітря може відбуватися в ламінарній і турбулентній областях течії. У випадку ламінарного режиму змішування лімітується молекулярною дифузією, у випадку турбулентного – турбулентною дифузією [75].

За рахунок турбулентної дифузії і тонкого перемішування на молекулярному рівні в печах здійснюється перемішування одночасно відносно великих об'ємів.

Для кінетичного принципу спалювання (рис. 2.19., б) характерно подавання в робочий простір через пальник заздалегідь перемішаної однорідної горючої суміші. Оскільки сумішоутворення завершується практично до печі, то повний період згорання газу визначається швидкістю перебігу реакції. Як правило, факел полум'я за кінетичного спалювання виходить мінімальним – безполуменеве спалювання.

Змішаний принцип спалювання (рис. 2.19., в) полягає в подаванні заздалегідь перемішаного з частиною повітря, необхідного для горіння (первинного повітря) горючого газу з роздільним підведенням у піч іншої частини повітря (вторинного повітря). Відповідно утворюється два фронти горіння: дифузійний і кінетичний. Швидкістю повільнішого етапу визначають повний час згорання палива.

Отже визначальним чинником є організація та якість сумішоутворення у випадку спалювання газоподібного палива.

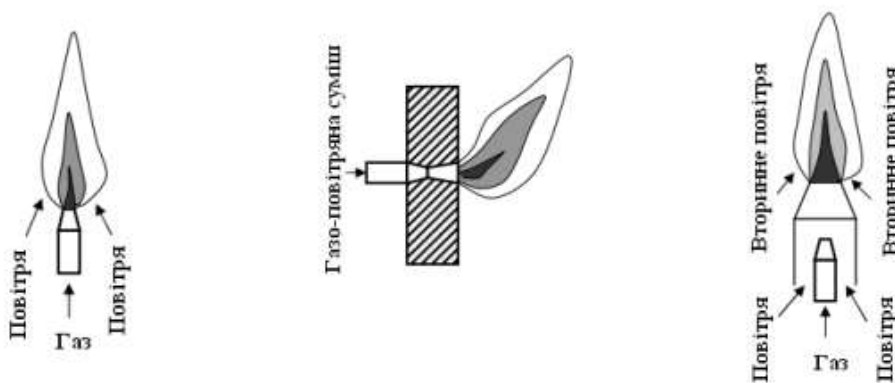


Рисунок 2.19. Принципи спалювання газу: а) дифузійний; б) кінетичний; в) змішаний [75]

Для виконання вогневого випробування вирішено використовувати газ, тому що це більш екологічно чисте паливо, яке містить набагато менше шкідливих речовин, у тому числі CO₂ (майже у два рази менше).

Подавання газу відбуватиметься за допомогою двох газових балонів з встановленими редукторами на кожен балон. Регулятор має манометр, який показує поточний тиск в балоні, та запобіжний клапан, який спрацьовує у випадках, коли газовий пристрій має більший рівень споживання газу, ніж може витримати регулятор, або проривається труба. Застосування манометра спрямоване на перевіряння герметичності установки. Газові балони будуть встановлені на безпечну відстань від вогневої установки.

Пристрої, які застосовують для спалювання газоподібного палива – газові пальники. Призначення газового пальника:

- підготувати суміші газу і повітря;
- подавати газоповітряну суміш у робочий простір в заданому напрямі;
- забезпечувати займання газоповітряної суміші за усіх навантажень;
- створювати факел необхідної довжини та випромінювальної здатності;
- створювати необхідну інтенсивність горіння;
- забезпечувати повне згорання палива.

Виконання вищеперерахованих вимог можливе тільки за умови правильного поєднання пальників із камерами згорання (робочим простором).

Утворення горючої суміші у пальниках (рис. 2.20) реалізується одним із способів:

1. Зовнішнє змішування газу та повітря (рис. 2.20, а), коли в робочий простір надходять роздільні потоки газу та повітря, а утворення горючої суміші відбувається за межами пальника в об'ємі полум'я – в робочому просторі. За таким способом працюють дифузійні пальники, розраховані

на спалювання із дуже довгим факелом. Під час спалювання палива, яке містить вуглеводні, утворюється добре видиме полум'я.

2. Кінетичне (рис. 2.20, б, в) коли в пальнику часткове змішування компонентів горіння, яке відбувається в об'ємі факелу після виходу суміші у камеру згорання. На цьому принципі влаштовані пальники змішування, які залежно від якості змішування мають меншу або більшу довжину факелу.

3. Часткове внутрішнє змішування (рис. 2.20, г) – це коли з пальника надходить газоповітряна суміш, яка містить частину повітря, необхідного для повного згорання, та інше (вторинне) повітря, яке підводиться до факелу з атмосфери, яка оточує полум'я, або подається від вентилятора.

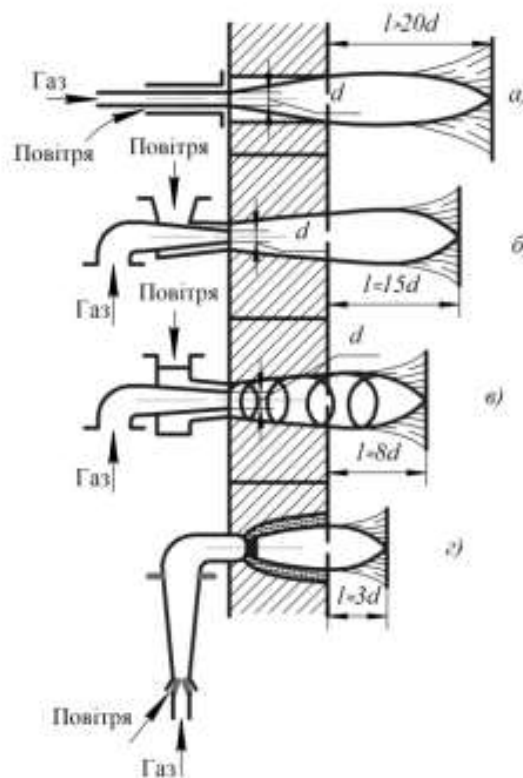


Рисунок 2.20. Рух суміші в пальниках: а – дифузійний пальник; б – довгофакельний пальник; в – короткофакельний турбулентний пальник; г – безфакельний інжекційний пальник [75]

Іноді пальники класифікують за довжиною факела:

- довгофакельні;
- короткофакельні;
- безфакельні.

Іншими ознаками класифікації газових пальників є:

1. Тиск газу:

- низького тиску – до 5 кН/м²;
- середнього тиску – 5...300 кН/м²;
- високого тиску – понад 300 кН/м².

2. Ступінь очищення газу:

- для очищеного газу;
- забрудненого газу.

3. Підігрівання компонентів горіння.

4. За матеріалом, який використаний для виготовлення:

- металеві;
- керамічні;
- цегляні.

Для твердого і рідкого палива нижчу теплоту згорання визначають за формулою Д. І. Менделєєва [78]:

$$Q_{вр} = 0,339 C_p + 1,03 H_p - 0,109(O_p - S_p) - 0,25 W_p, \text{ кДж/кг.} \quad (2.2)$$

Для газоподібного палива нижча теплота згорання:

$$Q_{вр} = 0,127 CO + 0,108 H_2 + 0,234 H_2S + 0,357 CH_4 + \Sigma Q_{100} C_m / H_n, \text{ кДж/м}^3, \quad (2.3)$$

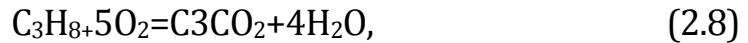
$$C = C_3H_8, \quad (2.4)$$

$$[C] = 36 \times 100\% / 44 = 81,8, \quad (2.5)$$

$$[H]=8 \times 100 / 44 = 18,2, \quad (2.6)$$

$$Q_{вр} = 339 \times 81,8 + 1257 \times 18,2 = 50\,607,6 \text{ кДж/кг} = 50 \text{ МДж/кг}. \quad (2.7)$$

Виділення енергії на одиницю маси кисню:



$$M(C_3H_8) = 12 \times 3 + 8 \times 1 = 44. \quad (2.9)$$

Для згорання 44 кг C_3H_8 необхідно 320 кг O_2 :

$$50\,607,6 \times 44 \text{ кг} / 320 \text{ кг} = 6\,958,5 \text{ кДж/кг} \times O_2. \quad (2.10)$$

Щоб зберігався температурний режим, час розрахунку дорівнює 60 хв.

Максимальна температура горіння – 2 500 °С.

Пропан-бутан – до 2 000 °С.

Проаналізувавши види палива, пальників та їхній принцип роботи, було обрано пальник газоповітряний з довжиною пальника 715 мм, діаметром сопла 76 мм, фірма-виробник MASTERTOOL PROFİ, тип ГП (44-5018).

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З НАГРІВАННЯ ФРАГМЕНТІВ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1. Експериментальне обладнання та процес створення малогабаритної вогневої установки

За кордоном у сфері пожежної безпеки, у міжнародному стандарті [3] та у європейському стандарті [74] та для визначення межі вогнестійкості будівельних конструкцій застосовано метод виконання випробувань, який полягає у визначенні проміжку часу від початку виконання випробування до настання одного з нормованих для такої конструкції граничних станів вогнестійкості в умовах стандартного температурного режиму [81].

Використовуючи опрацьований матеріал у розділі 2 та проаналізувавши літературні джерела [82 – 86], встановлено, що можна виконувати дослідження на визначення вогнестійкості будівельних конструкцій стандартного розміру в існуючих великогабаритних печах. Відносно ефективності такі вогневі печі мають істотний недолік: випробування у них неекологічні, коштовні, та трудомісткі.

Впроцесі нагрівання було досліджено зміну температури по товщині стінової конструкції, за допомогою вогневої печі для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій та окремих вузлів їхніх стикових з'єднань [87] та за ознакою втрати теплоізолювальної здатності встановлено межу вогнестійкості. Але конструкція вогневої печі для нагрівання камери передбачає використання лише одного пальника, що може впливати на рівномірність прогрівання досліджуваних конструкцій. Крім того, така

піч працює на рідкому паливі та може бути застосована лише для випробування стін. Це водночас говорить про недосконалість конструкції.

В Україні нині діє стандарт [1], в якому визначені вимоги щодо засобів, способів та методики виконання випробування з оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. На думку дослідників [82–86] стандарт дещо застарів та потребує перегляду. Проте, нині вимоги, зазначені у ньому, є обов'язковими для виконання випробувань на оцінювання вогнестійкості. Недоліком зазначеного є те, що нерівномірність температурного поля не контролюється як фактор, що впливає на фрагмент у камері печі, відповідно контроль якості випробувань є недостатній. Водночас різниця температур в 100 °С і більше в камері печі під час виконання випробувань однорідних зразків залізобетонної конструкції призводить до встановлення різних меж їхньої вогнестійкості (різниця може бути десятки хвилин) [88–89]. Цієї особливості не враховує установка, описана в [82].

Перед тим, як створити випробувальну установку, було виконано більше 30 спроб моделювання її різних конфігурацій: змінювалися габарити камери вогневої печі, які мали бути за задумом мінімальними, але достатніми для подальшого аналізу теплового впливу пожежі на конструкції, змінювали розташування та кількість отворів для відведення продуктів горіння, для пальників та розташування самих пальників.

Після було обрано конфігурацію печі, в якій температура рівномірно розподілилась по обігрівальній поверхні всіх 4-ох видів досліджуваних фрагментів та давала змогу у камері печі створити необхідний температурний режим, а також виконувала основні вимоги нормативних документів.

На основі змодельованої конфігурації створено схему випробувальної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції, яка відображена на рис. 3.1.

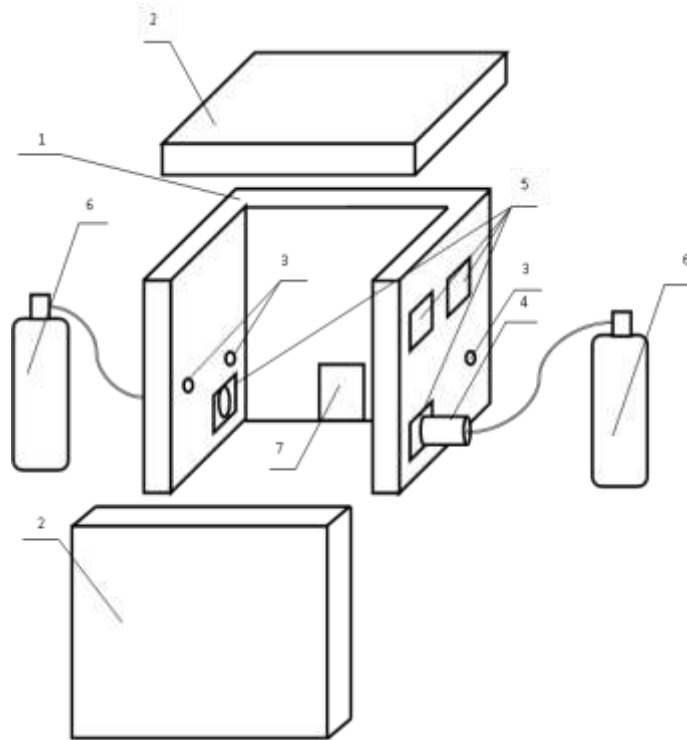


Рисунок 3.1. Малогабаритна вогнева установка для дослідження теплового впливу на несучі залізобетонні стіни: 1 – п-подібне огороження печі; 2 – знімні панелі; 3 – отвори для встановлення датчиків контролю температури; 4 – пальники; 5 – отвори для встановлення пальників; 6 – газовий балон з регулювальним апаратом; 7 – отвір для відведення продуктів горіння

Як видно з рис. 3.1., малогабаритна вогнева установка має 4 отвори для пальників, 2 газові балони з регулювальним апаратом, 2 знімні панелі, отвір для відведення продуктів горіння.

Провівши літературний аналіз та розробивши схему вогневої установки для виконання вогневих випробувань, розпочато будівництво вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції.

Етапи створення малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу на малогабаритні фрагменти несучих залізобетонних стін [90]:

1. Заливка фундаменту під камеру вогневої печі: вирито котлован для основи під камеру вогневої печі, сконструйовано та встановлено опалубку, вирівняно та укладено піщано-щебневий шар, встановлено плиту та залито її рідкою цементною сумішшю, рис. 3.2.



Рисунок 3.2. Створення фундаменту як основи під камеру вогневої печі [90]

На рис. 3.2. відображено виритий котлован розміром 1,6 м×1,6 м, який записано щебнем фракцією 5 – 10 мм, встановлено залізобетонну плиту 1,2 м×1,2 м та залито рідкою цементною сумішшю врівні із залізобетонною плитою.

2. Вогневу піч побудовано з вогнетривкої цегли, яка відповідає нормам [6] та забезпечує достатню термоізоляцію камери, оскільки у камері вогневої печі температура буде досягати 1 000 °С, вирішено зробити низ камери вогневої печі з вогнетривкої цегли, для того щоб збільшити термічну стійкість печі, рис. 3.3.



Рисунок 3.3. Піддон камери вогневої печі з вогнетривкої цегли

Піддон камери вогневої печі розміром 1,2 м×1,2 м з вогнетривкої цегли.

3. Для створення малогабаритної універсальної вогневої установки для дослідження вогневого впливу на основні типи залізобетонних будівельних конструкцій прийнято конструкторське рішення, а саме: у камері вогневої печі зробити 4 отвори для пальників. Також зроблено 1 отвір для відведення продуктів горіння розміром 125 мм×100 мм, рис. 3.4.

Під час виконання експериментального дослідження з прогрівання стіни чи плити використовуємо тільки 2 отвори з 4, а 2 інші закриваємо мінеральною ватою, що забезпечує ізоляцію від підтоку повітря ззовні. Місце розташування пальників можливо змінювати залежно від виду та типу досліджуваного фрагмента.



Рисунок 3.4. Отвори для встановлення пальників, один з лівої сторони п-подібного огородження печі та 3 з правої, а також отвір для відведення продуктів горіння

4. Димохід камери вогневої печі має дві частин: цегла в один ряд та вбудована сталева труба з товстостінного металу 10 мм діаметром 20 см, яка витримує до 1 000 °С та легко монтується, рис. 3.5.



Рисунок 3.5. Димохід камери вогневої печі

Ця сталева труба врізана у витяжну систему побудованої поруч будівлі.

5. Знімні панелі розміром 1,2 м×1,2 м, які зроблені із звареного каркасу з металу, де розміщена мінеральна вата, поверх якої закріплені магнезитові листи товщиною 10 мм зі сторони, яку піддають температурному впливу граничною температурою 1 200 °С, тривалістю вогневого впливу до двох годин.



Рисунок 3.6. Знімні панелі з магнезитовими листами

Після двох тестових експериментів магнезитові листи втратили свої властивості, хоча в характеристиках зазначено, що такий лист витримує температуру до 1 200 °С, через це у камері вогневої печі були значні втрати тепла. В тестових експериментах температура у камері вогневої печі досягла максимум 650 °С.

Проаналізувавши характеристики листів нержавіючої сталі, зокрема стійкість до впливу агресивних середовищ, нагрівання та охолодження до високих показників температури, відмінну переносимість температурних перепадів, вирішили замінити магнезитові листи на листи нержавіючої сталі та під час виконання вогневих експериментів накрити всю піч мінеральною ватою з фольгою для зменшення втрат тепла.

Вогневу піч було побудовано п-подібної форми, одну сторону конструкції печі збудовано не було, що дозволяє досліджувати фрагменти залізобетонної стіни та плити в умовах реальної пожежі.

Характеристика камери печі наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

| Параметри камери вогневої печі | | |
|--|----------------|----------|
| Параметри | Одиниці виміру | Величина |
| Потужність | кВт | 100 |
| Максимальна температура нагрівання простору камери вогневої печі | °С | 1050 |
| Об'єм робочої камери вогневої печі | м ³ | 1 |
| Габаритні розміри (внутрішнього простору камери вогневої печі): | | |
| ширина | мм | 1000 |
| довжина | мм | 1000 |
| висота | мм | 1000 |
| Максимальна швидкість нагрівання камери печі | °С/хв | 85 |

Засоби вимірювальної техніки, які використані під час експерименту з дослідження теплового впливу на будівельні конструкції наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

| Вимірювальні засоби | | | |
|---------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|
| № п/п | Найменування обладнання або приладу | Діапазон вимірювання | Похибка вимірювань |
| 1. | Термопара ТХА-2388 з модулем АЦП | від -200 до +700 °С, від +700 до +1 350°С | ± 2,0 °С, ± 4,0 °С |

| № п/п | Найменування обладнання або приладу | Діапазон вимірювання | Похибка вимірювань |
|-------|-------------------------------------|--|---|
| 2. | Терморезистори | від +5 до +300 °С | ± 1,0 % |
| 3. | Вимірювальна лінійка | від 0 мм до 1000 мм | ± 1 мм |
| 4. | Секундомір пр-2б-2-000 СОС | від 0 с до 60 с, від 0 с до 60 хв | $\pm \left(\frac{0,4}{60} \tau \right)$ $\pm \left(0,4 + \frac{1,5}{3540} (\tau - 60) \right)$ |
| 5. | Психрометр МВ-4М аспіраційний | від 10 % до 100 %, від - 10 °С до 50 °С | ± 4 % ± 0,2 °С |
| 6. | Штангенциркуль ЩЦ-1 | від 0 мм до 125 мм | ± 0,1 мм |
| 7. | Барометр-анероїд М67 | 600–800 мм рт. ст. | ± 1 мм рт. ст. |
| 8. | Анеометр АСО-3 | від 0,3 м/с до 5 м/с | ± (0,1+0,05V) м/с |

Для вимірювання температури у печі використовували термопари ТХА-2388 з діаметром дроту 1,25 мм, вимірювали температуру в діапазоні від 0 до 1 300 °С.

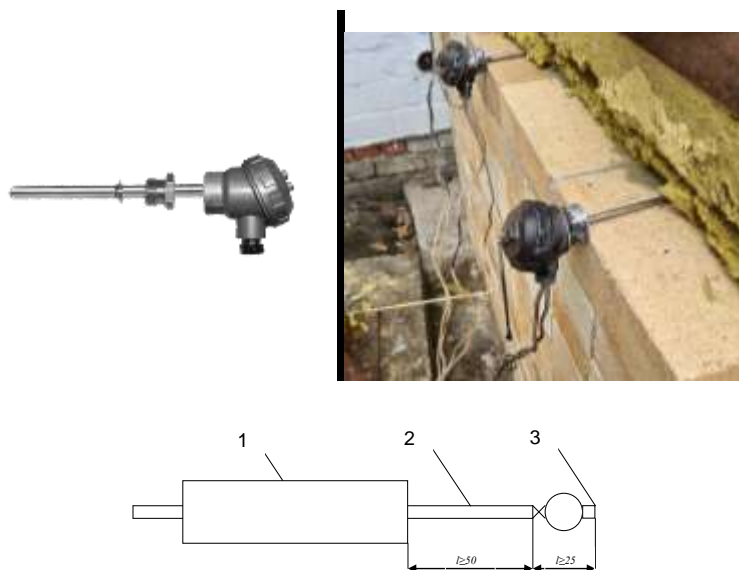


Рисунок 3.7. Загальний вигляд та схема термопари для вимірювання температур у робочому просторі камери печі:

1 – теплозахисна оболонка; 2 – захисний кожух; 3 – вимірювальний спай

Для вимірювання температур в досліджуваному зразку використовували термістори MF 52 (рис. 3.8.) з діапазоном вимірювання температури від -30 до 300 °С.



Рисунок 3.8. Термістор MF 52 для вимірювання температури в досліджуваному зразку

В місцях встановлення засобів вимірювальної техніки для зняття цифрових значень температури було розроблено систему метрологічного забезпечення – модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопар та терморезисторів. Такий вимірювальний технічний пристрій дозволяє вимірювати температуру з чутливістю в $0,25$ °С. На базі мікросхеми max. 31855 побудовано модуль, який враховує температуру холодних спаїв та автоматично вносить виправлення у значення вимірювання температури. В цьому модулі розміщено 12 датчиків контролю температури, але він може вміщувати й до 56.



Рисунок 3.9. Спеціальний засіб зчитування інформації – блок комбінованого обчислення температур

Для контролювання числових значень температури та побудування відповідних графіків в режимі реального часу використовувався плагін PLX DAQ Microsoft.

3.2. Методика виготовлення та формування малогабаритних фрагментів несучих залізобетонних стін для випробування

Відповідно до [1] зразки для випробування на вогнестійкість мають бути виготовлені згідно з технічною документацією за дотримання технології, що застосована на підприємстві-виробнику. Зразки повинні мати розміри, що відповідають проектним розмірам будівельних конструкцій. Якщо зразки таких розмірів випробувати неможливо, можливо використовувати зразки – фрагменти конструкцій. Мінімальні розміри зразків-фрагментів регламентовано стандартами щодо методів випробування на вогнестійкість конструкцій конкретних типів.

Для випробування одношарових й симетричних багат шарових конструкцій потрібно два однакових зразки. Для виконання випробування багат шарових несиметричних конструкцій потрібно виготовити чотири однакових зразки. У випадках, якщо відомий напрямок вогневого впливу на конструкцію чи бік конструкції із меншою вогнестійкістю, необхідно виготовити два однакових зразки [1].

Вологість зразків повинна відповідати технічним умовам та бути врівноваженою з навколишнім середовищем за температури від 5 до 40 °С із відносною вологістю від 45 до 75 %. Для отримання відповідної вологості зразків можливе штучне чи природне сушіння за температури повітря, яка не перевищує 60 °С.

Фрагмент залізобетонної стіни – це просторова конструкція. Армування конструкцій фрагмента стін й матеріали, які застосовували, а

саме: бетон та арматура, – відповідали використовуваним для будівництва житлових будинків із монолітного залізобетону.

Фрагмент стіни для дослідження виготовляли за допомогою стандартної розбірної опалубки.

На рис. 3.10. зображено фото заздальгідь підготовлених фрагментів, зразки № 1, 2 та 3 для виконання експериментів з нагрівання малогабаритних елементів несучих залізобетонних стін.

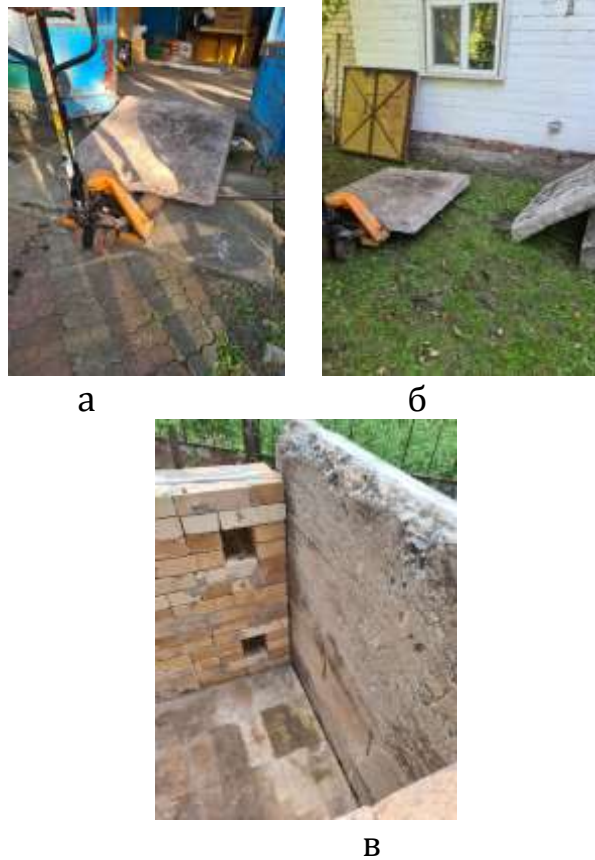


Рисунок 3.10. Малогабаритні фрагменти несучих залізобетонних стін, виготовлені заздальгідь до проведення експериментів:

а – транспортування фрагментів; *б* – 2 фрагменти, підготовлені до виконання експериментів, 1 уже встановлений у камері вогневої печі;
в – фрагмент стіни, встановлений до початку випробування, на місці експерименту

Як видно на рис. 3.10., а, фрагменти зберігали у закритому приміщенні, а потім транспортували до місця виконання експерименту та встановлювали у вогневу піч.

Малогабаритні фрагменти залізобетонних стін виготовляли заздалегідь до випробувань у кількості 3 шт.

Фрагменти виготовили за такими пропорціями: на 1 м³ портландцементу марки «500» – 460 ± 10 кг, піску кварцового – 660 ± 10 кг, щебня гранітного – 1 150 ± 10 кг, вода.

Армування відповідало фактично використовуваним для будівництва конструкцій несучих стін сучасних будинків із монолітного залізобетону – дріт класу Вр-I, діаметр 5 мм.

Для вивчення, як впливає структура бетону на теплофізичні параметри, виготовлено три групи по 1 зразку с різним водоцементним співвідношенням. Вода/цемент = 0,3 × (вода – 138 ± 10 кг); з фракціями (щебеню) – 10, 15, 20 мм.

За допомогою вагових дозаторів заводського БСУ виконано дозування складових. У бетономішалці вільного падіння виконано перемішування бетонної суміші об'ємом 0,75 м³. Глибинними вібраторами виконано ущільнення бетонної суміші.

Виготовлення конструкцій здійснювали за допомогою стандартної розбірної опалубки.

На рис. 3.11. представлено фото виготовлення фрагментів залізобетонних несучих стін для виконання експериментального випробування.



Рисунок 3.11. Фото виготовлення фрагментів несучих залізобетонних стін для виконання дослідження з їхнього нагрівання

Зразки знаходилися в опалубці впродовж 7 діб. Після розпалубки фрагмент тужавів протягом 28 діб в закритому приміщенні.

Після витримки 28 діб фрагменти несучих залізобетонних стін зберігалися в нормальних умовах вологості та температури до початку експерименту.

На обігрівальній поверхні зразка встановлено 3 термопари типу ТХА, на необігрівальній поверхні – 3 терморезистори та на рівні арматури – 3 терморезистори з діапазоном замірювання 5 – 300 °С.

На схемі, рис. 3.12., показані місця розташування термопар та терморезисторів у проєкційному зв'язку з врахуванням їхньої видимості на проєкціях.

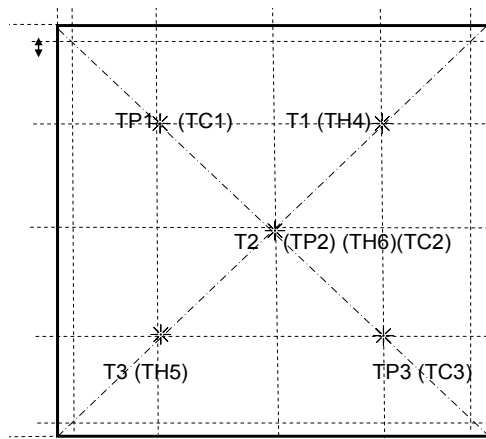


Рисунок 3.12. Схема розташування засобів вимірювальної техніки в перерізі залізобетонної стіни-зразка для виконання експерименту

На схемі відображено засоби вимірювальної техніки, які пронумеровано наступним чином: на необігрівній поверхні (0,03 м від поверхні) – терморезистори ТН4 – ТН5; на рівні арматури – терморезистори ТР1 – ТР3; на обігрівній поверхні термопари Т1 – Т3; посередині досліджуваного фрагмента ТС1 – ТС3.

За вищезазначеною методикою були виготовлені три фрагменти залізобетонної стіни-зразка для виконання випробувань, рис. 3.13.



Рисунок 3.13. Вигляд заздалегідь виготовленого фрагмента несучої залізобетонної стіни для виконання випробування зі встановленими датчиками контролю температури

На рис. 3.13. зображені встановлені термомпари на обігрівальній поверхні залізобетонної стіни на рівні арматури та терморезистори на необігрівальній поверхні.

3.3. Методика виконання експериментального дослідження з нагрівання фрагмента несучої залізобетонної стіни у малогабаритній вогневій установці

Методика виконання експериментів з нагрівання малогабаритного фрагмента несучої залізобетонної стіни у малогабаритній вогневій установці полягає у впливі стандартного температурного режиму пожежі без механічного навантаження за умови нагрівання елемента залізобетонної стіни з однієї сторони, на основі якого розрахунковим методом можливо здійснити оцінювання межі вогнестійкості будівельних конструкцій, які будуть відповідати їхнім реальним розмірам та запроєктованим навантаженням.

Випробування виконувалися за температури навколишнього середовища $26^{\pm 1}$ °C та відносній вологості повітря 58 %, що відповідає вимогам [1-2].

Випробування фрагментів стін-зразків виконували за методами, що регламентовані [1-2], які полягають у визначенні проміжку часу від початку виконання випробування за стандартним температурним режимом згідно з [1] за умови вогневого впливу з обігрівної сторони фрагмента стіни-зразка [2].

Межу вогнестійкості конструкції визначають за формулою [1]:

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

де t_{fr} – межа вогнестійкості, хв;

t_{mes} – значення часу від початку вогневого випробування до досягнення граничного стану з вогнестійкості, хв;

Δt – похибка вогневого випробування.

Похибку вогневого випробування визначають наступним чином [13].

Під час випробувань в камері вогневої печі для інтервалу часу від 0 до t_{mes} визначають інтегральне значення A_f середньої температури T_f за такою формулою [13]:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{fi} + T_{fi-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.2)$$

де T_{fi} – значення середньої температури в камері вогневої печі, що відповідає часу t_i , °C;

t_i – час i -го циклу вимірювання середньої температури;

i – номер циклу вимірювання середньої температури (дорівнює часу t_i , якщо вимірювання виконують через 1 хв);

n – номер циклу вимірювання, для якого $t_i = t_{mes}$.

Таким же чином для інтервалу часу від 0 до t_{mes} визначають інтегральне значення A_s стандартної температури T_s за формулою [13]:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5 (T_{si} + T_{si-1}) (t_i - t_{i-1}), \quad (3.3)$$

де T_{si} – значення стандартної температури, що відповідає часу t_i , °C.

Формулу для розрахунку значення температури T_s залежно від часу наведено в [13].

- Якщо $A_f \geq A_s$, то $t=0$.
- Якщо $A_f < A_s$, то похибку Δt визначають за формулою [13]:

$$\Delta t = (0,015 t_{mes} + 3) (A_s - A_f) / (A_s - A_{min}), \quad (3.4)$$

де A_{min} – інтегральне значення мінімально допустимої температури T_{min} в інтервалі часу від 0 до t_{mes} , °С·хв.

Значення A_{min} визначають за формулою, аналогічною формулам (3.2) і (3.3) [13]:

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

де $T_{min\ i}$ – значення мінімально допустимої температури T_{min} , що відповідає часу t_i , °С.

Температуру T_{min} визначають за формулою [13]:

$$T_{min} = T (1 - |0,01d|), \quad (3.6)$$

де d – допустиме відхилення середньої температури в камері печі від температури T_s , %.

Межу вогнестійкості визначають за результатами міцнісного розрахунку, для визначення відхилення наведені в [1]. Для випробувань було використано три зразки-близнюки фрагментів стін.

Визначалися вертикальні деформації зразків у двох точках по одній з кожного краю. Додатково вимірювали всі суттєві горизонтальні деформації (5 мм і більше), посередині вертикального краю зразка та в центрі зразка, на відстані від краю 50 мм.

У випадку досягнення одного з граничних станів випробування припиняли. Настання граничного стану визначають згідно із вимогами стандартів [1–2].

Загальна методика виконання експериментального дослідження прогрівання залізобетонної стіни у створеній установці для дослідження

теплого впливу пожежі на будівельні залізобетонні конструкції: до п-подібного огородження печі встановлюють фрагмент залізобетонної конструкції. В отвори для датчиків контролю температури в камері вогневої печі 3 та в досліджуваному зразку 8 встановлюють датчики. Далі запалюють пальники, які встановлюють у отвори для пальників та за допомогою подавання газу з газового балону, у середині камери печі створюється заданий температурний режим. В нижній частині камери печі розміщено отвір для відведення продуктів горіння. Контроль температури досліджуваного зразка здійснюють за допомогою спеціальних технічних засобів, а результати вогневих експериментів обробляють відповідно до чинних стандартів. Таким чином отримуємо експериментальні дані, які лягають в основу розрахункової методики, та відповідно визначаємо фактичну межу і ступінь вогнестійкості будівельних конструкцій.

3.4. Процес виконання експериментального дослідження з нагрівання фрагментів несучих залізобетонних стін та його результати

Наше дослідження було виконано на базі Навчального комплексу практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.

До початку експерименту фіксуємо дату виконання та температуру навколишнього повітря. Перед початком замірюємо габаритні розміри зразка, його товщину та фіксуємо встановлені дані.

Зовнішні умови: дата виконання експерименту: 05.08.2021;
температура повітря: 26⁺¹ °C; вологість повітря: 58 %.

Було виготовлено 3 зразки, габаритні розміри яких: 1193 × 1195 мм; 1198 × 1194 мм; 1201 × 1199 мм.

Зразок для виконання експерименту закріплюємо в передній частині установки. Верхню частину установки закриваємо знімною панеллю. Для запобігання вивітрюванню гарячих газів з печі через щілини та стики прилягання знімної панелі між стінками вогневої печі та знімної панелі розміщено азбестовий шнур. Для зменшення втрати тепла знімні панелі накриті фольгованою мінеральною ватою товщиною 10 мм. На (рис. 3.14) показано схему встановлення малогабаритного зразка несучої залізобетонної стіни у камеру вогневої печі.

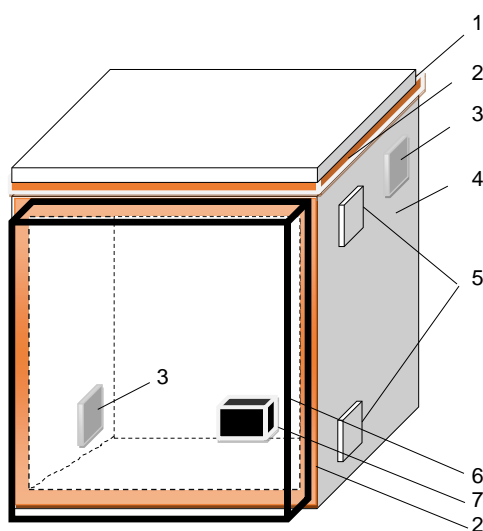


Рисунок 3.14. Схема встановлення зразка для експерименту: 1 – знімна панель, яка закриває верхню частину малогабаритної установки; 2 – ущільнювач з азбестового шнура та мінеральної вати; 3 – пальники, які у камері печі створюють температурний режим; 4 – п-подібне огородження печі; 5 – місця для пальників, що не використовують під час експерименту та закупорені шаром мінеральної вати густиною 120 кг/м³, завтовшки 120 мм; 6 – зразок стіни, що досліджуємо; 7 – отвір для виходу продуктів горіння

Під час виконання експерименту із прогрівання стін використовуємо 2 пальники. Вони розміщені зверху і знизу дальньої

частини установки так, щоб факели полум'я не контактували один з одним та знаходились в 80 см до випробувального зразка. Для недопущення вивітрювання пічних газів через отвори, які не задіяні в експерименті з прогрівання стін, місця для пальників, які не використовуємо під час випробування стіни, було закладено мінеральною ватою.

На рівномірність розподілу температури по обігрівальній поверхні залізобетонних будівельних конструкцій впливає розміщення отворів для відведення продуктів горіння та пальників.

Два пальники під'єднано до двох газових балонів з регулювальним апаратом та розміщено їх на безпечній відстані.

До початку виконання експерименту встановлено термопари й терморезистори в просторі камери вогневої печі та у досліджуваному зразку: в камері вогневої печі розташовано 3 термопари типу ТХА для можливості контролювати температурний режим та забезпечувати його відповідність стандартному; на обігрівальній поверхні зразка встановлено 3 термопари та на рівні арматури також 3 типу ТХА; на необігрівальній поверхні та посередині перерізу зразка розташовано 5 терморезисторів із діапазоном замірювання 5 – 300 °С (рис. 3.12).

На рис. 3.15 показано місця розташування термопар у камері вогневої печі під час дослідження прогрівання малогабаритного фрагмента залізобетонної стіни.



а

б

Рисунок 3.15. Розташування засобів вимірювальної техніки під час виконання експерименту з нагрівання несучої залізобетонної стіни: а – ліва сторона п-подібної камери вогневої печі, б – права сторона, де розташована одна термопара

Під час виконання дослідження з нагрівання фрагмента несучої залізобетонної стіни температура в печі відповідала вимогам, які регламентовані стандартом. Візуальним оглядом встановлено, що втрати цілісності теплоізолювальної несучої здатності зразка не відбулося, але на (рис. 3.16) видно, що почалась деструкція зразка залізобетонної стіни з виділенням пари та вологи, що знаходяться всередині конструкції.



Рисунок 3.16. Фрагмент несучої залізобетонної стіни після виконаного експерименту

На (рис. 3.17) зображено графік температурно-часової залежності прогрівання фрагмента несучої залізобетонної стіни на обігрівальній поверхні.

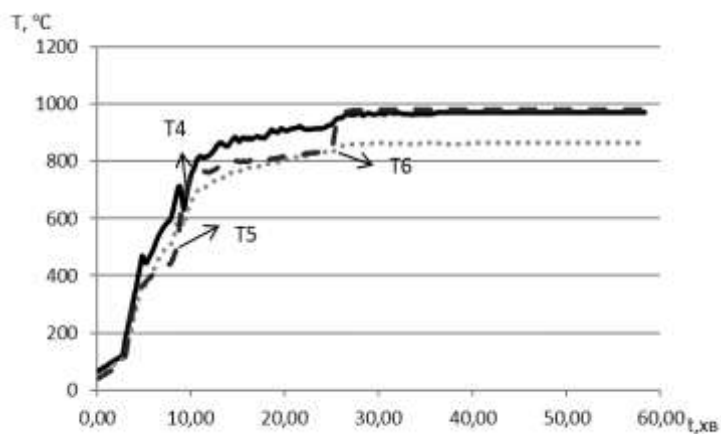


Рисунок 3.17. Лінійна швидкість прогрівання досліджуваного фрагмента несучої залізобетонної стіни: T4–T6 термопари, встановлені на обігрівальній поверхні

Як свідчать дані датчиків контролю температури (рис. 3.17), лінійна швидкість прогрівання фрагмента несучої залізобетонної стіни відповідала «стандартній» температурній кривій пожежі та знаходилась в межах, визначених стандартом [1]. Після досягнення значення 980 °C встановлено стаціонарний режим за допомогою регулювання потужності нагрівання камери печі. Експеримент тривав 60 хвилин.

На (рис. 3.18 – 3.19) відображено графік температурно-часової залежності на необігрівальній поверхні, посередині перерізу фрагмента несучої залізобетонної стіни та на рівні арматури.

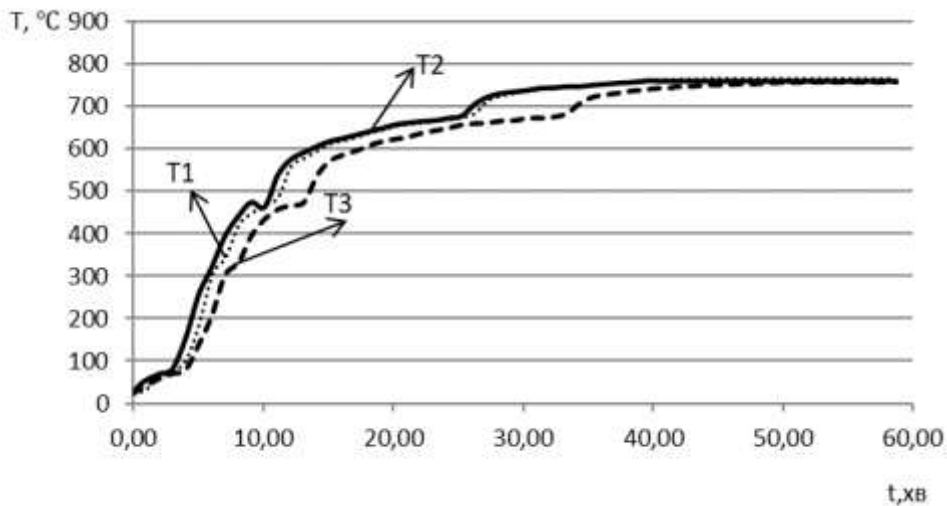


Рисунок 3.18. Результати вимірювання температури у досліджуваному зразку: $T1$, $T2$, $T3$ – показники термопар, які встановлені на рівні арматури

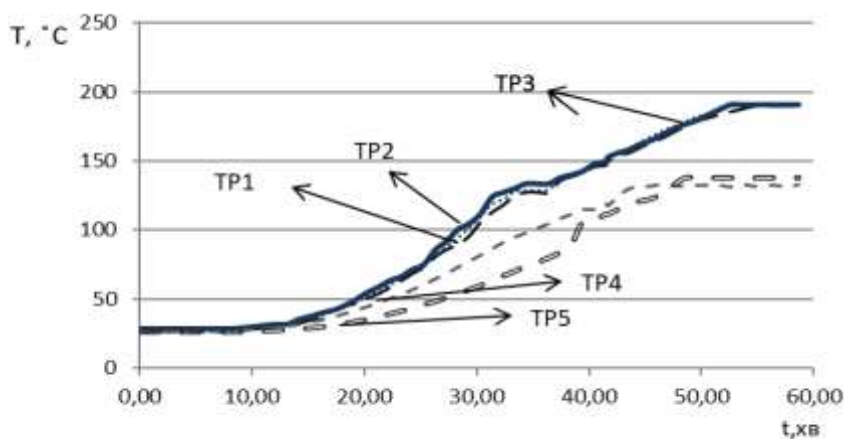


Рисунок 3.19. Результати показників терморезисторів у фрагменті досліджуваного зразка: $TP1$, $TP2$, $TP3$ – результати показників терморезисторів, встановлених по середині перерізу стіни; $TP4$, $TP5$ – дані терморезисторів, які встановлені на необігрівальній поверхні

Проаналізувавши дані, отримані відповідно до результатів виконаного експерименту, було сформульовано наступні висновки:

- два газові пальники здатні забезпечувати у камері вогневої печі відповідність «стандартному» температурному режиму на 60 хв під час виконання дослідження;

- під час нагрівання несучої залізобетонної стіни спостерігались виділення вологи та пару, які знаходяться всередині матеріалу: на обігрівальній поверхні цей процес відбувся з 15 до 25 хвилини, на необігрівальній – з 35 до 57 хвилини, а на рівні арматури – з 32 до 52 хвилини;

- прогрівання конструкцій на всіх рівнях було рівномірним у площинах розміщень термопар (рис. 3.18. – 3.19.);

- максимальна температура на рівні арматури була 765 °С, яку спостерігали на останній хвилині дослідження, вона продовжувала лінійно зростати після виходу із плато;

- на необігрівальній поверхні максимальна температура була 137 °С, яка спостерігалась на останній хвилині дослідження та продовжувала лінійно зростати після виходу з плато;

- експериментальних даних достатньо для виконання далі розрахування температурних полів всередині конструкції та оцінювання її вогнестійкості.

Перспектива до удосконалення конструкції вогневої печі:

1. Таку конструкцію вогневої печі збудовано вперше. Для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції більших розмірів є можливість побудувати вогневу піч відповідних розмірів, але це є не обов'язково, оскільки реальні розміри конструкції та пожежне навантаження, яке закладають в процесі проектування будівлі можна визначити розрахунковим методом.

2. Під час виконання тестових запусків вогневої печі були втрати тепла через нещільне прилягання знімних панелей до п-подібного огороження печі, доцільним є облаштування ущільнювача з негорючих матеріалів, щоб знімні панелі прилягали щільніше. Також для зменшення втрат тепла під час виконання вогневого випробування доцільно

використовувати утеплювач, наприклад, мінеральну вату з фольгованим покриттям, в місцях розташування знімних панелей.

3.3 метою забезпечення необхідної вологостійкості установки доцільно створити засоби для обмеження зовнішніх опадів для запобігання руйнування цегли та бетону.

4.3 метою забезпечення можливості виконання дослідження теплового впливу пожежі на основні типи будівельних конструкцій та дотримання основних вимог щодо виконання випробувань доцільно удосконалити знімні панелі шляхом заміни листа нержавіючої сталі на інший вогнетривкий матеріал.

5. Для забезпечення безперебійного подавання газу необхідно збільшити кількість отворів у пальниках, щоб кисень потрапляв у сопло пальника.

3.5. Перевіряння адекватності результатів виконання експериментального дослідження

Необхідно отримати кількісні показники щодо адекватності для з'ясування того, наскільки експерименти здатні до відтворення результатів виконаних експериментів. Перевіряння адекватності виконано на підставі отриманої інформації внаслідок експериментів з прогрівання малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій, під час яких помітні процеси, які нас цікавлять [91]. Було виконано 3 експерименти у малогабаритній вогневій установці за стандартним температурним режимом пожежі ідентичних та одночасно виготовлених конструкцій за однакових зовнішніх умов.

Для подальшого дослідження необхідно розрахувати відносну, абсолютну похибки експериментальних даних та показів температури кожної термопари для послідовного порівняння дисперсій, що

розташовані у конструкції з дисперсією відтворюваності експериментальних випробувань. Можливо перевірити гіпотезу щодо розподілу температур на кожній хвилині експерименту та рівності генеральних дисперсій за допомогою F-критерію Фішера [92, 93].

$$F = \frac{S_{xy}^2}{S_y^2}, \quad (3.7)$$

де S_{xy}^2 – дисперсія адекватності;

S_y^2 – дисперсія відтворюваності.

Як відхилення між показами конкретної термопарі розрахована дисперсія адекватності та середнього значення температури у всіх трьох експериментах відповідного її місця замірювання температури [94].

$$S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}, \quad (3.8)$$

де n – кількість замірювань температури;

y_i – значення критерію в процесі моделювання;

x_i – значення критерію під час експерименту.

Як відхилення температури конкретної термопарі і середнього значення температури по всіх дослідах у місцях її розташування з урахуванням похибки термопар розрахована дисперсія відтворюваності [1].

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y} + 1)^2 \quad (3.9)$$

де n – кількість вимірювань температури;

$\bar{y} + 1$ – середні показники термопар із урахуванням похибки;

y_i – показники термопар безпосередньо у місці вимірювань.

Таблиця 3.3 – Параметри дисперсії результатів 3-ох експериментів з прогрівання малогабаритного елемента залізобетонних стін

| Зона термопар (рис. 3.12) | Абсолютне середнє відхилення, °C | Відносне відхилення, % | F-критерій | Критичне значення F-крит. |
|---------------------------|----------------------------------|------------------------|------------|---------------------------|
| T1 | 4,56 | 1,49 | 1,04 | 4,49 |
| T2 | 4,91 | 1,41 | 1,13 | |
| T3 | 4,84 | 1,66 | 1,01 | |
| TP1 | 8,4 | 2,21 | 1,01 | |
| TP2 | 8,7 | 1,95 | 1,32 | |
| TP3 | 8,6 | 2,06 | 2,06 | |
| TP4 | 8,6 | 2,31 | 1,02 | |
| TP5 | 8,6 | 2,73 | 1,01 | |

Як видно з таблиці 3.3, розрахований критерій адекватності (F-критерій Фішера) нижче за критичне значення, а відносне відхилення не перевищило 3 %, що підтверджує адекватність отриманих експериментальних даних.

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ЧАСТИНИ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ОЦІЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

4.1. Методика відновлення температурних розподілень у перерізі стінових елементів за точковими замірами

Найбільш поширеним є підхід, коли теплофізичні характеристики матеріалів залізобетонних несучих стін описують всі складні фізико-хімічні процеси, які відбуваються у цих матеріалах за умови їхнього нагрівання, та є температурними залежностями для розв'язання теплотехнічної задачі. Матеріали залізобетонних несучих стін мають пористий каркас із певним вмістом вологи [95–96]. Сам пористий каркас має гідрокристалічну будову. Тому процес нагрівання супроводжується конденсацією, фільтрацією вологи у рідкому та газоподібному станах та випаровуванням. В такому разі не мають прямого фізичного змісту теплофізичні характеристики і називаються ефективними. Але такий підхід набув широкого поширення і дає достатньо точні результати. В такому випадку рівняння теплопровідності називають квазілінійним (формула 1.10).

Зважаючи на велику різницю у коефіцієнтах, в армованих стінах враховують теплопередавання тільки у відповідній бетонній матриці, тому розглядають відповідні теплофізичні характеристики. На рис. 4.1 та рис. 4.2 подані теплофізичні характеристики бетону.

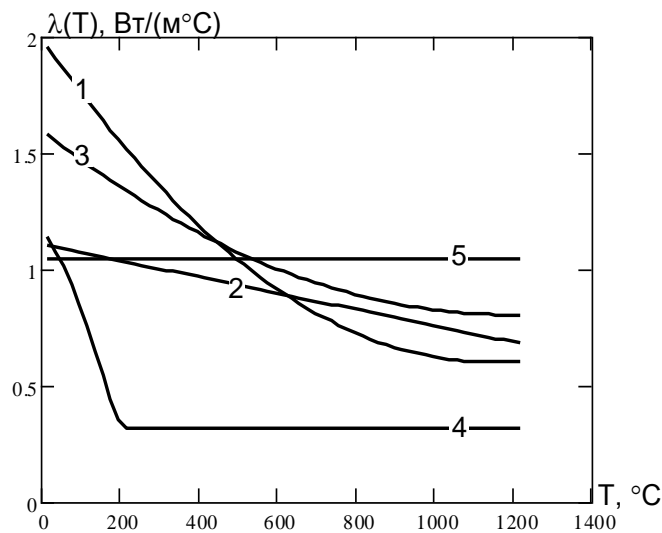


Рисунок 4.1. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності:
 1 – за рекомендаціями [5]; 2 – за рекомендаціями [97]; 3 – згідно з даними роботи [27]; 4 – згідно з даними роботи [98]; 5 – усереднені дані

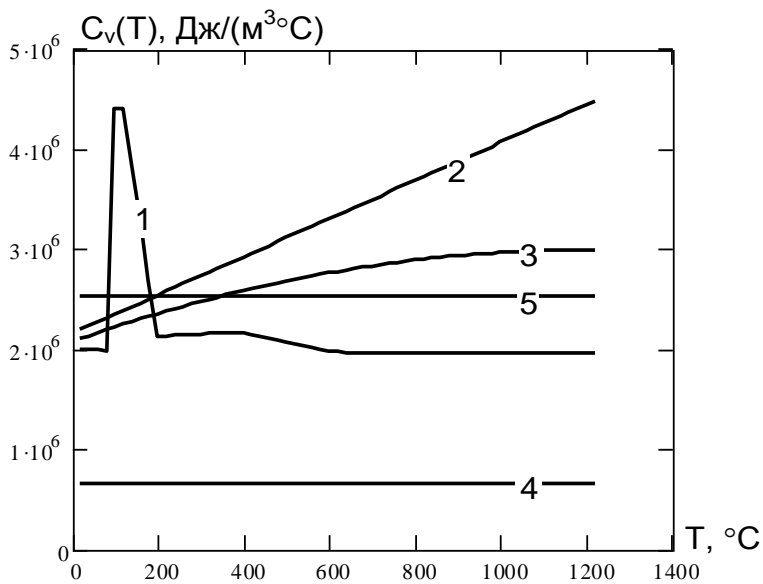


Рисунок 4.2. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності:
 1 – за рекомендаціями [5]; 2 – за рекомендаціями [97]; 3 – згідно з даними роботи [27]; 4 – згідно з даними роботи [30]; 5 – усереднені дані

Для розв'язування рівняння теплопровідності (4.1) використовують граничні умови III роду [29], формула 1.11.

Коефіцієнт теплообміну враховує дію інфрачервоного випромінювання та конвекції, його визначають за формулою [29] і формулою 1.12.

Для вивчення розподілу температури по перерізу плит та несучих стін під час вогневих випробувань розглянемо розрахункову методику, засновану на розв'язку рівняння (1.12) із граничними умовами III роду (1.11). Водночас з використанням розрахункової схеми була поставлена гранична задача, яка подана на рис. 4.3.

Математична модель теплопередавання у цьому випадку добре описана у роботах [25, 27-28, 53, 98-104]. Також використовують рівняння теплопровідності [105]:

$$Cv(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (4.1)$$

де $Cv(T) = \rho(T)c_p(T)$ – об'ємна питома теплоємність.

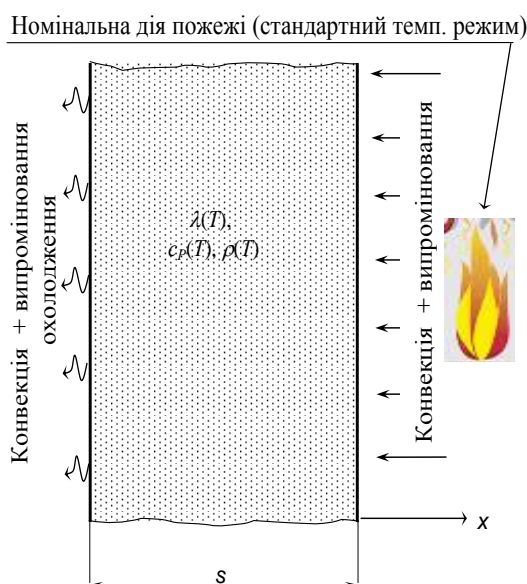


Рисунок 4.3. Розрахункова схема моделі теплопередавання під час нагрівання стінового елемента в процесі вогневих випробувань [105]

Вираз (4.2), який відповідає граничним умовам III роду на обігрівній поверхні, записують у вигляді [13]:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b} = \alpha (T_p - T_w) \quad (4.2)$$

Вираз (4.3) граничних умов III роду, на необігрівній поверхні стіни записують у вигляді [13]:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (293 - T_n) \quad (4.3)$$

де α , α_k – коефіцієнти теплообміну на обігрівній та необігрівній поверхнях відповідно, який визначають за формулою (4.3).

Згідно з рекомендаціями [97] можна визначити з виразів конвективні і радіаційні складові коефіцієнта теплообміну:

$\alpha_k = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – поверхня, яка обігривається;

$\alpha_k = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – поверхня, яка не обігривається;

$$\alpha_p = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_w^4 - T_p^4}{T_w - T_p} \quad (4.4)$$

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

Початкова температура стіни та навколишнього середовища $T_0 = 293 \text{ К}$.

Температуру пожежі визначають за формулою (1.1), яка зображує стандартний температурний режим пожежі.

Для розв'язування прямої задачі нестационарної теплопровідності була застосована підстановка Гудмена [106]:

$$H = \int_0^T C_V(T) dT, \quad (4.5)$$

У лінеаризованому вигляді записують рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(H(T)) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right], \quad (4.6)$$

де $k(H(T)) = \lambda(H(T))/C_V(H(T))$.

У роботі [107–109] добре описаний алгоритм розв'язання рівняння (4.7). Кінцево-різницева апроксимація рівняння була виконана в дійсній формі із застосуванням інтегро-інтерполяційного методу [109] у вигляді:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{H_{k+1,i} - H_{k,i}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(H(T)) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right] = \frac{1}{\Delta x^2} (aH_{k,i-1} - (a+b)H_{k,i} + bH_{k,i+1}), \quad (4.7)$$

де

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta x} \frac{dx}{k(H(T))} = \frac{(k[H(T_{i-1})] + k[H(T_i)])\Delta x}{\Delta x \cdot k[H(T_{i-1})]k[H(T_i)]},$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta x} \frac{dx}{k(H(T))} = \frac{(k[H(T_{i-1})] + k[H(T_i)])\Delta x}{\Delta x \cdot k[H(T_{i-1})]k[H(T_i)]}. \quad (4.8)$$

Були вибрані часовий та просторовий кроки, враховуючи умову збіжності, які дорівнюють $\Delta t = 15$ с, $\Delta x = 0,005$ м. За дійсними рекурентними формулами після кожного циклу обчислень було розв'язано квадратне рівняння, яке утворювалося за умови інтегрування за формулою (4.8) кусково-лінійних залежностей теплоємності, які визначають за рис. 4.1 – рис. 4.2.

Якщо встановлені температурні розподіли шляхом інтерполяції й уточнених пружно-пластичних властивостей матеріалу стін, можна вирішити міцнісну задачу. Для цього потрібно вибрати відповідний розрахунковий метод, який запропоновано у нормах [19], він полягає у поступовому збільшенні кривизни стіни в бік обігрівальної сторони у кожний контрольний момент часу випробування на кожному кроці збільшення деформації з одночасним визначенням поздовжньої сили. В момент досягнення критичного значення переміщення, яке визначають за формулою (1.5), розрахунок припиняють. Із отриманих значень сили вибирають найбільше, яке в подальшому буде вважатися несучою здатністю випробуваної стіни. Розрахунок виконують із використанням системи рівнянь (1.10).

Для математичного описання механічних властивостей основного матеріалу стіни використовують формули (4.9) [19].

$$[\mathbf{F}]\{\mathbf{k}\} + \{\mathbf{S}\} = 0, \quad (4.9)$$

де $\{k\} = (k_{c1} \ k_{c2} \ \dots \ k_{cm})^T$ – вектор табличних значень коефіцієнта роботи матеріалу стіни, який відповідає табличним температурам $\{T_m\} = (0 \ 100 \ 200 \ \dots \ T_m)^T$, які виступають як невідомі.

Для того, щоб описати механічні властивості арматурної сталі, були застосовані стандартні діаграми, що описані формулами (4.10) – (4.11). На рис. 4.4 відображені діаграми деформування для арматурної сталі А 500С.

Зусилля в арматурі в i -тий момент часу встановлюють за виразами, які наведені у вимогах щодо розрахунку залізобетонних конструкцій [19]:

$$\begin{aligned}
 \text{якщо } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{s0} & F_{st}(\varepsilon, T) = E_{s,T}\varepsilon, \\
 \text{якщо } \varepsilon_{s0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{sy} & F_{st}(\varepsilon, T) = f_{sp,T} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}, \\
 \text{якщо } \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st} & \sigma_s = f_{sy,T}, \\
 \text{якщо } \varepsilon_{st} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{s2} & F_{st}(\varepsilon, T) = f_{sy,T} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})], \\
 \text{якщо } \varepsilon_{s2} < \varepsilon & \sigma_s = 0,
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

де: a, b, c – параметри, які визначають за формулами:

$$\begin{aligned}
 a^2 &= (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp} + c/E_{s,T}), \quad b^2 = c(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} + c^2 \\
 c &= \frac{(f_{sy,T} - f_{sp,T})^2}{(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} - 2(f_{sy,T} - f_{sp,T})}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

де:

ε_{sy} – деформація, за якої настає межа текучості;

ε_{st} – деформація, за якої починається спадна гілка діаграми;

$f_{sp,T}$ – межа пропорційності сталі;

$f_{sy,T}$ – межа міцності сталі;

$E_{s,T}$ – модуль пружності сталі, який залежний від температури нагрівання.

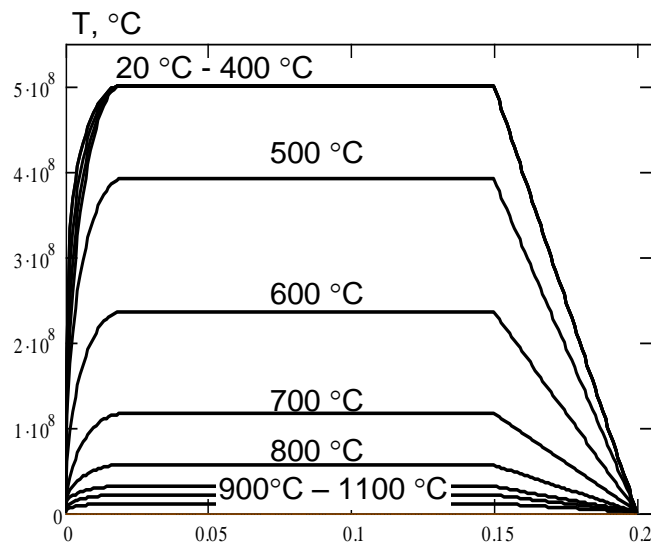


Рисунок 4.4. Діаграми деформування арматурної сталі стінових елементів

На рис. 4.5 відображено блок-схему для побудови графіка поздовжньої сили залежно від кривизни нейтральної лінії стіни.

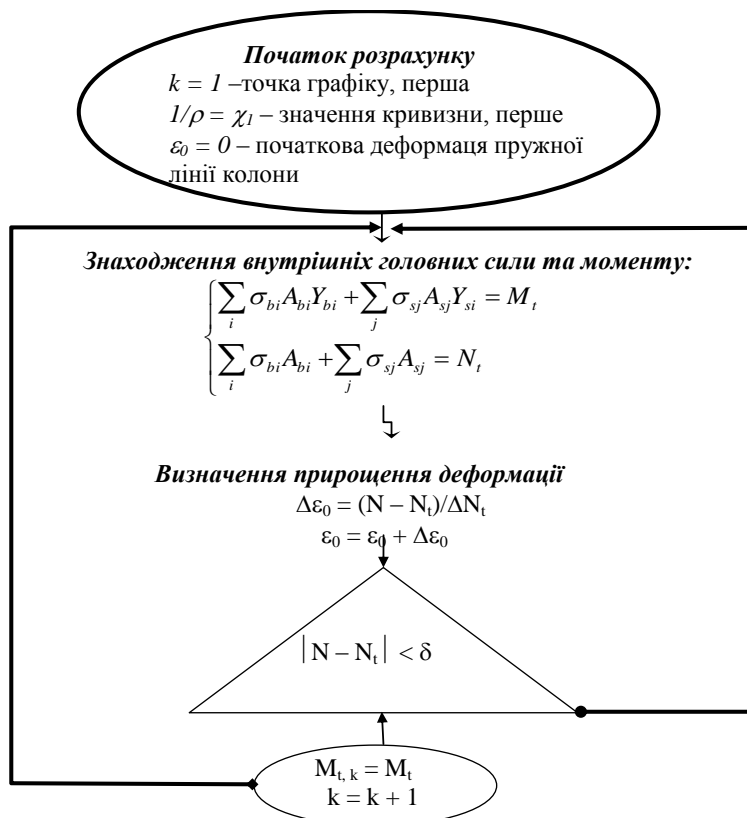


Рисунок 4.5. Блок-схема побудови графіка головного моменту у перерізі стіни

Відповідно до представленої блок-схеми (рис. 4.5.) на початку розрахунку необхідно вказати головний момент сили. Далі відповідно до алгоритму головний момент змінюється залежно від температурного впливу на стіну та її деформації в процесі нагрівання. Це враховують для визначення межі вогнестійкості стінового елемента, параметри якого в моделі задають з повними розмірами. Оскільки сила діє вертикально, він залежить від висоти стіни та величини навантаження на неї.

4.2. Відновлення температурних полів за результатами експериментальних досліджень

Методику використовують для встановлення межі вогнестійкості елементів будівельних конструкцій, зокрема стін, які підпадають під вплив теплового потоку за умови одностороннього нагрівання.

Використано інтерполяцію у вузлових точках перерізу у разі застосування значень температур, які виміряні в процесі виконання випробувань у контрольних точках перерізу для того, щоб врахувати зміни механічних властивостей залежно від температури.

На рис. 4.6 відображено розбиття перерізу стіни на зони та розташування датчиків контролю температур.

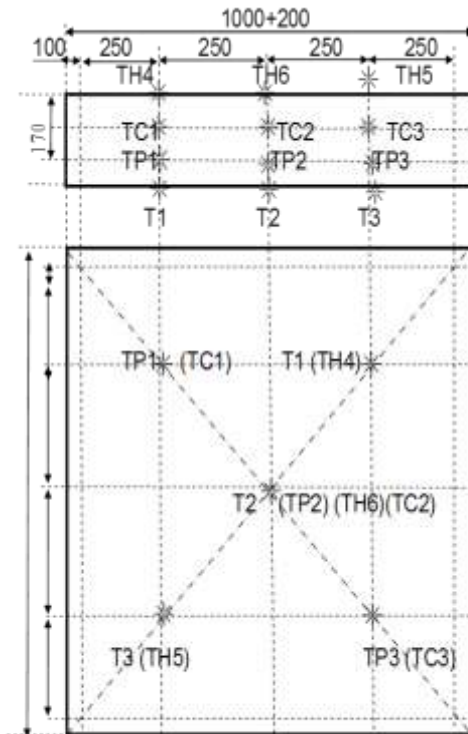


Рисунок 4.6. Схема розбиття перерізу стіни на зони та розташування термопар: встановлені термопари – $T1$, $T2$, $T3$ на обігрівній поверхні зразка; на рівні арматури термопари – $TP1$, $TP2$, $TP3$; на необігрівній поверхні – терморезистори $TH4$, $TH5$, $TH6$; посередині досліджуваного фрагмента – $TC1$, $TC2$, $TC3$

Для вимірювання температури у печі, на обігрівальній поверхні та на рівні арматури ми використовували термопари ТХА-2388 з діаметром дроту 1,25 мм, для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1 300 °С.

Для вимірювання температури на необігрівальній поверхні та посередині перерізу досліджуваного зразка використовували термістори MF 52 для вимірювання температури в діапазоні від –30 до 300 °С.

Температуру пожежі визначають за формулою (1.1), яка передає стандартний температурний режим пожежі.

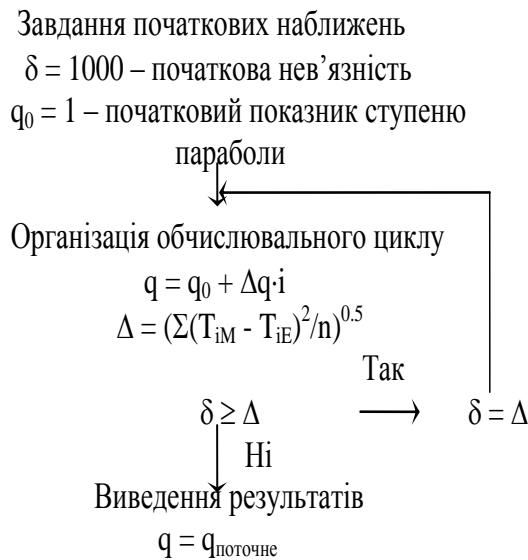


Рисунок 4.7. Блок-схема поетапного визначення показника ступеня апроксимувального поліному

Загальна блок-схема розрахунку апроксимації представлена на рис. 4.7. Алгоритм розрахунку заснований на представлених температурних кривих узагальненим виразом:

$$T_{k,i} = T_{0k} + (T_{\max k} - T_{0k}) \left[\frac{i}{n} \right]^{T_k}, \quad (4.12)$$

де $T_{k,i}$ – температура у k -тий момент часу i -тої точки перерізу стіни;

$T_{0k}, T_{\max k}$ – температура у k -тий момент часу першої та останньої точок;

n – кількість інтервалів між контрольними точками;

T_k – у k -тий момент часу показник ступеня параболі, який визначають за алгоритмом, зображеним на рис. 4.7.

В процесі вогневих випробувань під час нагрівання залізобетонної стіни у малогабаритній вогневій печі під дією власної ваги за стандартним температурним режимом пожежі було отримано

результати прогрівання в необхідних контрольних точках для розрахунку [110]. Наступним етапом є оцінювання вогнестійкості цього елемента конструкції за несучою здатністю розрахунковим шляхом.

Методика дозволяє на основі отриманих експериментальних даних оцінити межу вогнестійкості несучих залізобетонних стін за несучою здатністю, якщо застосовувати розрахунок на міцність за стандартною температурною кривою пожежі, у камері вогневої печі під дією власної ваги згідно з вимогами стандартів [1–2] в процесі застосування методу, який заснований на односторонньому прогріванні несучої залізобетонної стіни.

Загальна експериментально-розрахункова методика дає змогу виконувати випробування будівельних конструкцій, зокрема стіни, на вогнестійкість за температурним режимом згідно із [1] без прикладання механічного навантаження, яке враховують на етапі розрахунку, а вхідними даними для них є експериментальні.

Для того, щоб виконати розрахунок оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін на основі результатів прогрівання у малогабаритній вогневій печі, необхідні наступні дані:

- в кожену хвилину випробування згідно зі схемою на рис. 4.6 показники датчиків контролю температури;
- клас міцності арматури та бетону;
- тип крупного заповнювача бетону;
- діаметри арматури;
- кількість та розташування стержнів, які показано на рис. 4.8;
- дані щодо геометричних розмірів перерізу стіни;
- товщина захисного шару бетону;
- розрахункова товщина стіни та розподілене навантаження [111].

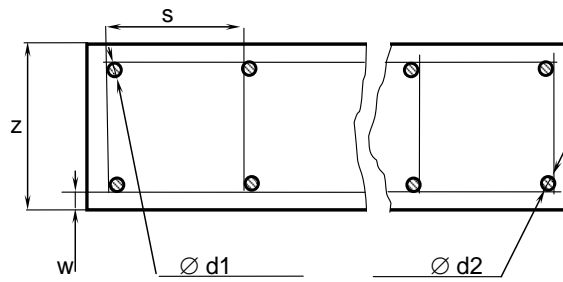


Рисунок 4.8. Схема розташування стержнів та діаметри арматури стіни

На рис. 4.9 показано лістинг сторінки введення початкових даних, а на рис. 4.10 відображено лістинг сторінки результатів.

| Кодовий параметр | Середня температура повітря, °С | Температура стіни, °С | Температура повітря, °С | Внутрішня поверхня стіни, °С | Зовнішня поверхня стіни, °С | Коефіцієнт теплопровідності стіни, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності арматури, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності бетону, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності цегли, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності керамзитових блоків, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності пінобетону, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності цегли, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності керамзитових блоків, Вт/м·К | Коефіцієнт теплопровідності пінобетону, Вт/м·К |
|------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|--|--|---|---|--|---|---|--|
| 4 | 55 | 28 | 28 | 25 | -0,0001956 | 0,00950687 | 0,0035 | | | | | | | | |
| 5 | 54 | 28 | 28 | 30 | -0,0002871 | 0,00950675 | | | | | | | | | |
| 6 | 76 | 28 | 28 | 88 | -0,00241 | 0,00986714 | | | | | | | | | |
| 7 | 90 | 28 | 28 | 80 | -0,0019384 | 0,00957829 | | | | | | | | | |
| 8 | 178 | 28 | 28 | 134 | -0,0013893 | 0,00950367 | | | | | | | | | |
| 9 | 218 | 28 | 28 | 237 | -0,0008495 | 0,00950478 | | | | | | | | | |
| 10 | 348 | 28 | 28 | 321 | 1,1431E-05 | 0,00944035 | | | | | | | | | |
| 11 | 401 | 28 | 28 | 395 | 0,00018448 | 0,00949728 | | | | | | | | | |
| 12 | 437 | 28 | 28 | 441 | 0,00054131 | 0,00911888 | | | | | | | | | |
| 13 | 484 | 28 | 27 | 474 | 0,00068903 | 0,00946258 | | | | | | | | | |
| 14 | 508 | 38 | 27 | 462 | 0,00098935 | 0,0103331 | | | | | | | | | |
| 15 | 604 | 31 | 27 | 538 | 0,00128112 | 0,0119887 | | | | | | | | | |
| 16 | 603 | 32 | 28 | 575 | 0,00188363 | 0,0148718 | | | | | | | | | |
| 17 | 614 | 32 | 28 | 591 | 0,00224565 | 0,0162171 | | | | | | | | | |
| 18 | 781 | 35 | 28 | 606 | 0,0024318 | 0,0175188 | | | | | | | | | |
| 19 | 738 | 37 | 28 | 608 | 0,0028836 | 0,0184845 | | | | | | | | | |
| 20 | 738 | 48 | 30 | 812 | 0,0028848 | 0,0195287 | | | | | | | | | |
| 21 | 747 | 42 | 31 | 815 | 0,0028836 | 0,0212758 | | | | | | | | | |
| 22 | 769 | 45 | 32 | 814 | 0,0032488 | 0,0227241 | | | | | | | | | |
| 23 | 768 | 58 | 34 | 820 | 0,0032858 | 0,023973 | | | | | | | | | |
| 24 | 777 | 55 | 36 | 821 | 0,00328241 | 0,0252371 | | | | | | | | | |
| 25 | 781 | 59 | 37 | 824 | 0,0034782 | 0,0264444 | | | | | | | | | |
| 26 | 788 | 63 | 39 | 832 | 0,00372448 | 0,0277242 | | | | | | | | | |
| 27 | 793 | 68 | 42 | 839 | 0,00389665 | 0,0289673 | | | | | | | | | |
| 28 | 796 | 71 | 44 | 841 | 0,00428849 | 0,0301884 | | | | | | | | | |
| 29 | 801 | 75 | 40 | 845 | 0,00421881 | 0,0313455 | | | | | | | | | |
| 30 | 804 | 86 | 49 | 848 | 0,00438185 | 0,032487 | | | | | | | | | |

Рисунок 4.9. Сторінка вводу початкових даних

$\Phi_{PO} := \Phi_{p_0}$ $RSC := \Phi_{p_1}$ $Nf := \Phi_{p_2}$
 Межа вогнестійкості стіни $\Phi_{PO} = \text{"Предел огнестойкости не достигнут"}$
 Ресурс несучої здатності стіни $RSC = 31.656\%$

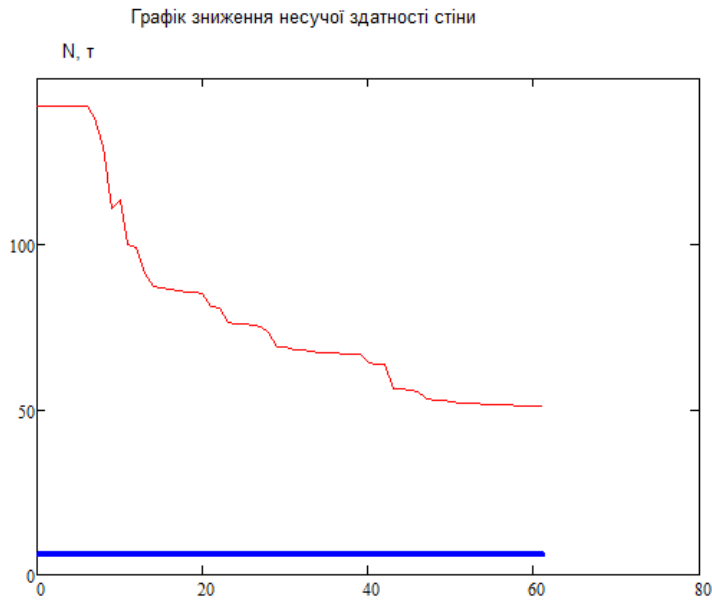


Рисунок 4.10. Сторінка кінцевих результатів

4.3. Результати використання запропонованого методу

Розглянемо конкретний приклад несучої залізобетонної стіни. На рис. 4.11 поданий вигляд перерізу стіни та схема її армування відповідно до схеми на рис. 4.7.

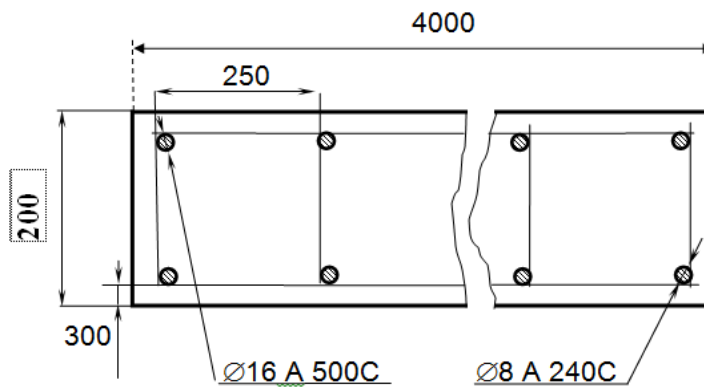
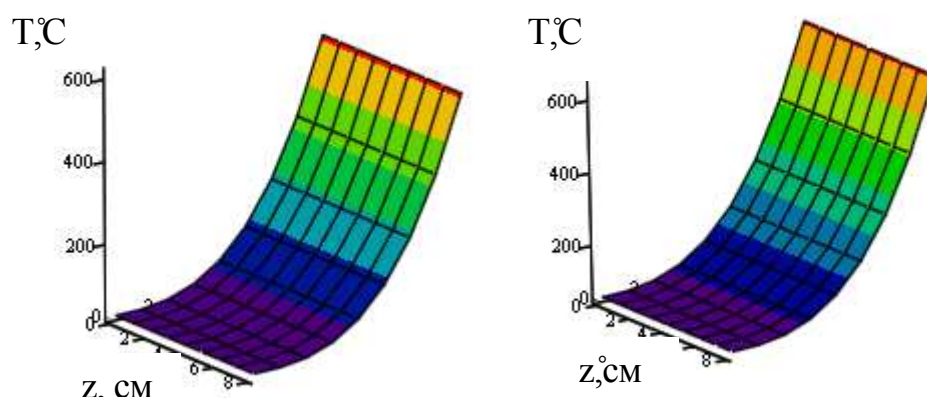


Рисунок 4.11. Параметри перерізу стіни

Основні параметри несучої залізобетонної стіни

| Параметри | Умовні позначення | Числові значення | Одиниці вимірювання |
|--|---------------------------------------|---|---------------------|
| Геометричні параметри: висота, товщина захисного шару, загальна товщина | b w z | 4 0,03 0,20 | м |
| Тип бетону | Важкий на гранітному заповнювачі | Клас С 30/35 (В30) | |
| Густина бетону | ρ_B | 2 230 | кг/м ³ |
| Робоча арматура: діаметр більший, діаметр менший, крок | d ₁ d ₂ s | 0,016 – Клас А500С 0,08 – Клас А240С 0,25 | м |

Після виконаної інтерполяції температур були отримані їхні розподіли, які показані на рис. 4.11.



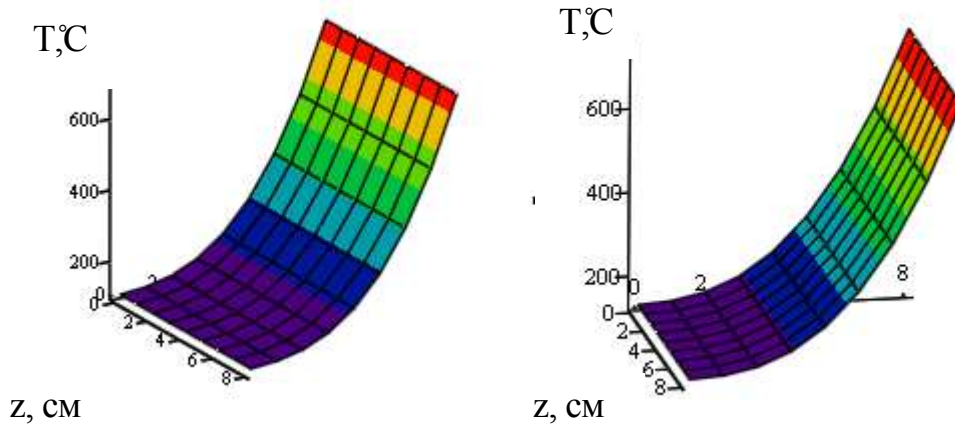


Рисунок 4.12. Результати виконаної інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу стіни

Для здійснення інтерполяції температур для перерізу несучої залізобетонної стіни згідно з рекомендаціями [19] були взяті результати розрахунку теплової задачі.

Відповідно до рекомендацій [19], а також даних таблиці 4.1, були побудовані міцнісні характеристики арматурної сталі та бетону, які подані на рис. 4.13.

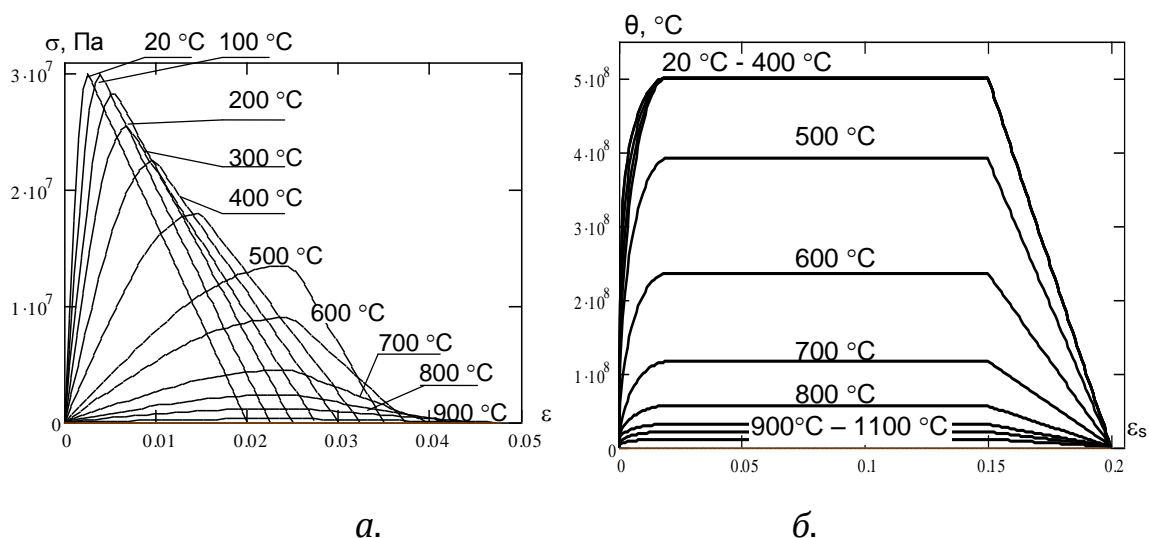


Рисунок 4.13. Діаграми деформування бетону (а) та арматурної сталі (б) [19]

Для розв'язування міцнісної задачі використовують зонний метод, який полягає у розділенні перерізу зони, яка на рівні ненагрітого бетону опирається механічним навантаженням, та ушкодженої зони, яка не здатна опиратися силовій дії механічного навантаження. Цей метод заснований на виконанні наступних процедур [19].

1. На n паралельних зон однакової товщини ділять половину товщини перерізу, де $n \geq 3$.

2. Визначають середню температуру для кожної із зон.

3. За діаграмою зниження міцності бетону для кожною із зон залежно від температури визначають коефіцієнт зниження опору на стиск $k_c(\theta_i)$.

4. Визначають середній коефіцієнт зниження для перерізу елемента, разом із коефіцієнтом $(1-0,2/n)$, що враховує під час розрахунку зміну температури кожної зони за формулою [19]:

$$k_{c,m} = \frac{(1-0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i), \quad (4.13)$$

де n – кількість в ширині паралельних зон w ;

w – половина повної ширини;

m – кількість зон.

5. Ширину пошкодженої зони перерізу для стін, колон та інших елементів будівельних конструкцій із стискальними навантаженнями, визначають за формулою [19]:

$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right]. \quad (4.14)$$

Був побудований графік зниження несучої здатності за отриманими значеннями максимальних моментів який зображений на рис. 4.14.

У результаті виконаного розрахунку було встановлено, що межа вогнестійкості за 60 хв не настає, а ресурс несучої здатності складає 31 %.

На рис. 4.14 показано графік зниження несучої здатності стіни із запропонованими характеристиками.

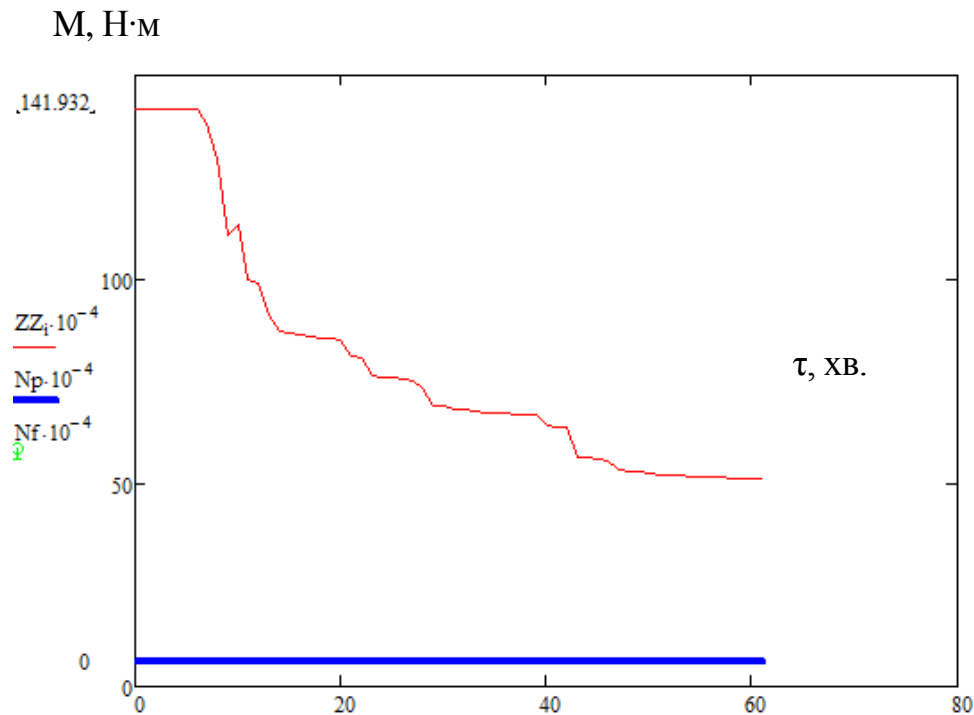


Рисунок 4.14 – Графік зниження несучої здатності стіни з розподіленим навантаженням 300 т

На рис. 4.14 продемонстровано зниження міцності стіни висотою 4 м з розподіленим навантаженням 300 т. Ці стіни відповідали характеристикам досліджуваного зразка та температурам прогрівання її шарів під час експерименту. Додатково вводились дані щодо висоти стіни та розподіленого навантаження, що запроєктоване під час конструювання об'єкту. Таким чином, можливо оцінити межу вогнестійкості для несучих стін з іншим робочим навантаженням та інших габаритів, змінивши їх.

4.4. Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін

Було порівняно результати, які отримані за запропонованим методом, з даними експериментального випробування на вогнестійкість несучої залізобетонної стіни [13]. Відповідно до протоколу випробування було отримано величини відхилень результатів запропонованого методу та випробувань на вогнестійкість схожої конструкції у вогневих печах.

Для цього додатково було виконано розрахунок межі вогнестійкості стіни аналогічного перерізу висотою 3 м з розподіленним навантаженням 300 т. Для врахування більшого часу прогрівання було виконано інтерполяцію результатів теплового впливу на стіну та виконано розрахунок з описаною вище методикою. Результати розрахунку представлено на рис. 4.13.

Для виконання випробування [13] використовувалась вогнева піч ВП-1 із навантажувальною рамою, інв. №20 (Атестат № 24-2/5983), приміщення для кондиціонування зразків ПКЗ-2, інв. №16 (Атестат № 24-2/0442).

Під час розрахунку [13] закладалися дані, які зазначені в табл.4.2.

Таблиця 4.2

Основні параметри залізобетонних фрагментів стін для випробування

| Параметри | Умовні позначення | Значення | Одиниці вимірювання |
|---|----------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Геометричні розміри: <ul style="list-style-type: none">• ширина,• ширина захисного шару,• довжина стіни,• висота стіни | s w l h | 0,2 0,02 3,2 3 | м |
| Тип бетону | Важкий на гранітному заповнювачі | Клас С 30/35 (В30) | |
| Густина бетону | ρ_b | 2300 | кг/м ³ |

| | | | |
|---|----------------|------------------------|---|
| Водоцементне співвідношення | В/Ц | 0,36 | |
| Гранична вологість | u | < 3 | % |
| Робоча арматура внутрішня: • діаметр | d ₁ | Клас A500С 0,016 | м |
| Робоча арматура зовнішня: • діаметр | d ₂ | Клас A240С 0,016 | м |
| Каркасна арматура: • діаметр | d ₃ | Клас A240С 0,008 | м |

На рис. 4.15 продемонстровано, що межу вогнестійкості стіни досліджуваної товщини та параметрів армування довжиною 3 м досягнуто за 150 хв не було. Після 1 години випробувань міцність стіни майже не знижується, це можна пояснити двома факторами: нагрівання стіни одностороннє і арматура, що знаходиться з необігрівального боку, продовжує виконувати свої функції за умови цілісності захисного шару бетону, та тим, що несуча стіна має достатню протяжність порівняно з колоною, тому її міцність у декілька разів вища. Аналогічні дані відображено у дисертаційному дослідженні [13], де наведено дані випробувань залізобетонних виробів, зокрема стінових елементів, для різних діаметрів арматури, різних класів міцності бетону та товщин захисного шару за розподіленого навантаження, що діє, різних товщин стін, а також виду армування.

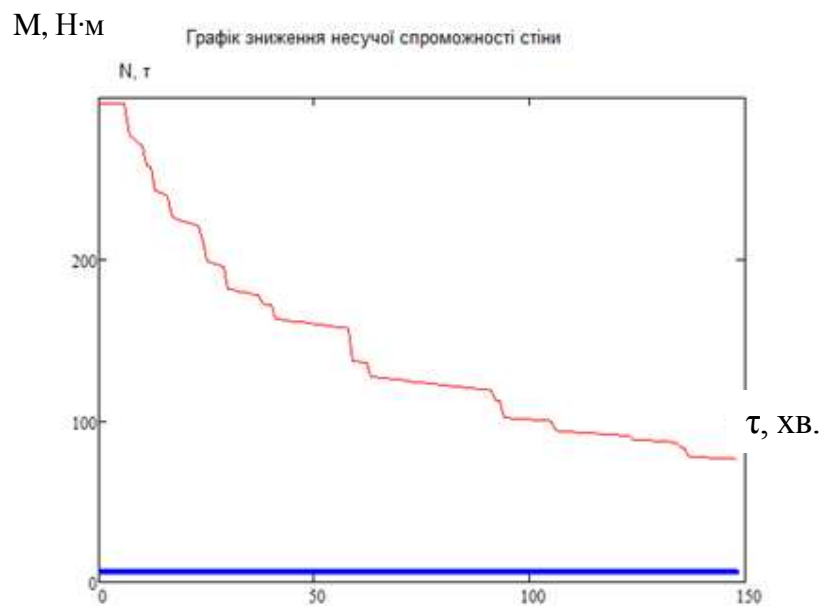


Рисунок 4.15. Графік зниження несучої спроможності стіни довжиною 3 м з розподіленим навантаженням 300 т, яку випробовували протягом 150 хв

Дані, що отримані під час експерименту, та дані експериментально-розрахункового методу підтверджують I ступінь вогнестійкості стіни з такими характеристиками. Таким чином, розрахунки можливо вважати адекватними.

РОЗДІЛ 5. АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ У МАЛОГАБАРИТНІЙ ВОГНЕВІЙ УСТАНОВЦІ

5.1. Загальний опис удосконаленої експериментально- розрахункової методики оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій

На основі розділів 1 – 4, в яких було досліджено та описано відомі існуючі вогневі установки, загальновідомі методи та засоби виконання вогневих випробувань, їхню актуальність; особливості комп'ютерного моделювання, етапи розроблення комп'ютерної моделі камери вогневої печі; особливості виконання експериментальних досліджень з нагрівання будівельних конструкцій; розрахункову частину методики оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій; було сформовано алгоритм, за яким доцільно виконувати оцінювання межі вогнестійкості за удосконаленим експериментально-розрахунковим методом, який представлений на рис. 5.1 як спрощена схема.

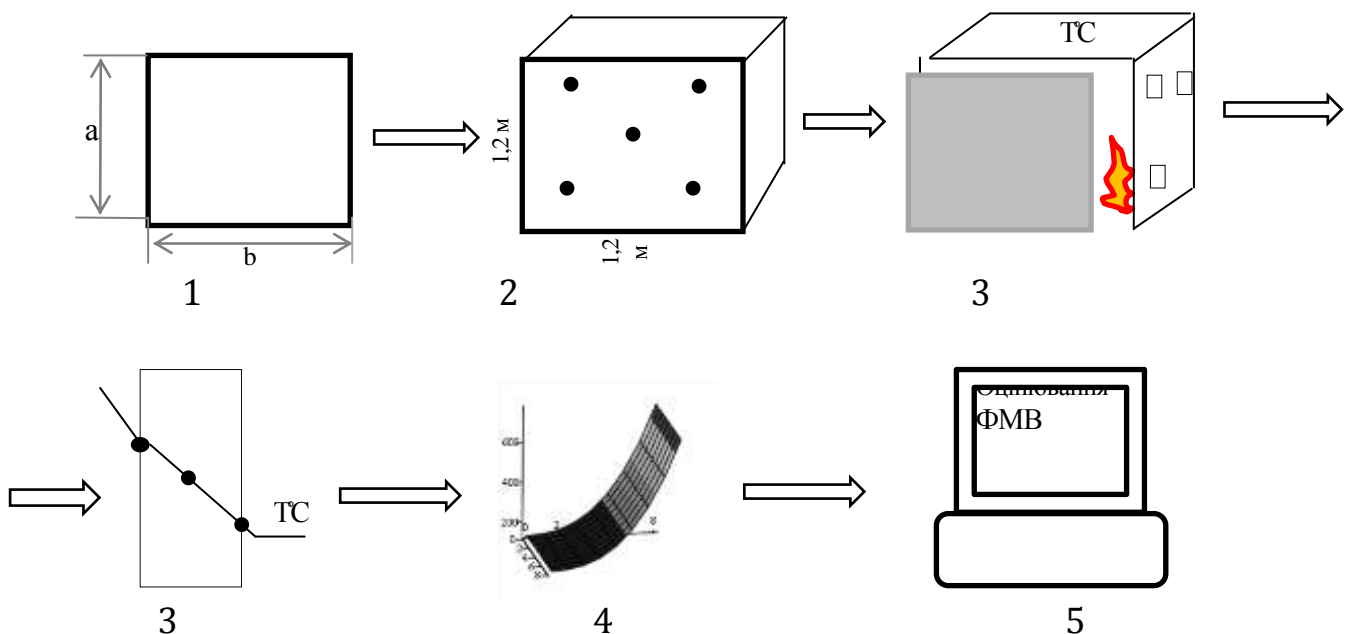


Рисунок 5.1. Спрощена схема удосконаленого експериментально-
розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих
залізобетонних будівельних конструкцій

Згідно із схемою на рис. 5.1. для оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій за допомогою удосконаленого експериментально-розрахункового методу спрощений алгоритм передбачає наступне.

1. Схематичне відображення розмірів елемента, який виготовляють заздалегідь для нагрівання у камері вогневої печі.

2. Підготовка зразка до випробувань з установленням датчиків контролю температури у камері вогневої печі та у досліджуваному фрагменті.

3. Експериментальне випробування з нагрівання досліджуваного фрагмента у камері малогабаритної вогневої установки.

4. Розподілення температури у перерізі несучих залізобетонних будівельних конструкцій на кожній хвилині випробування на основі точкових замірів температур під час нагрівання у камері печі.

5. Оцінювання межі вогнестійкості розрахунковим шляхом.

Вище коротко описано спрощений алгоритм оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, що дає змогу перейти до наступних розділів та зазначити деталі кожного пункту.

5.2. Вимоги щодо малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на залізобетонні будівельні конструкції

Для виконання експериментальної частини з нагрівання фрагмента несучих залізобетонних будівельних конструкцій необхідно використовувати вогневу установку, яка буде забезпечувати основні вимоги:

1. Рівномірність прогрівання камери вогневої печі та відповідно обігрівальної поверхні досліджуваного фрагмента. Для цього рекомендовано використовувати вогневу піч з мінімально можливим

розміром камери вогневої печі, яка здатна забезпечити мінімальну необхідну відстань від факела полум'я, а висота печі має забезпечувати необхідний мінімальний об'єм для циркуляції продуктів горіння, а отже і відтворення стандартного температурного режиму пожежі у камері вогневої печі.

2. Розміщення пальників. Пальники слід розміщувати таким чином, щоб забезпечити мінімально необхідну відстань від факела полум'я, щоб уникнути непрямих впливів вогню на стіни та забезпечити рівномірне поширення теплового потоку. Тобто рекомендовано дотримуватися встановлених стандартів щодо мінімальної відстані між пальниками та стінами.

3. Отвір для відведення продуктів горіння. Отвір для відведення продуктів горіння рекомендовано розміщувати внизу на задній стінці камери вогневої печі з можливістю зміни його розміру.

Для прикладу, на рис. 5.2. зображено рекомендовані мінімально можливі геометричні параметри малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на несучі залізобетонні будівельні конструкції відповідно до виконаного розрахунку.

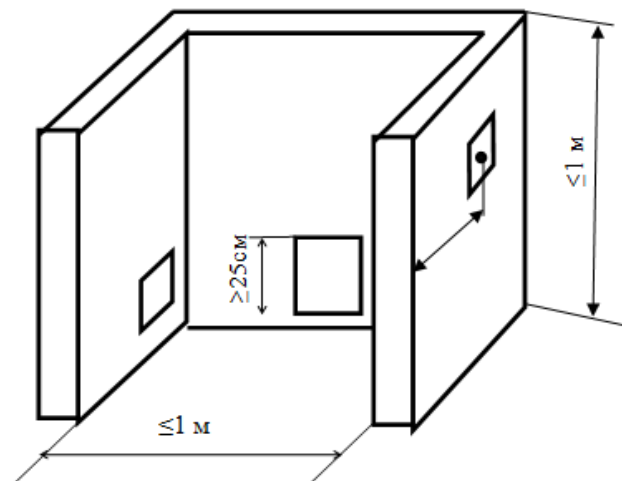


Рисунок 5.2. Рекомендовані мінімально можливі геометричні параметри малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на несучі залізобетонні будівельні конструкції

На прикладі діючої установки, описаної у розділі 3, необхідно дотримуватися такого алгоритму дій:

1. Камеру вогневої печі створювати п-подібної форми, яка дасть змогу за рахунок 2-ох знімних панелей випробовувати основні типи залізобетонних конструкцій, таких, як стіна, плита, балка чи колона та завдяки правильно розміщеним 4-ьом отворам для встановлення пальників з можливістю змінювати їхнє розташування залежно від виду елемента конструкції, що буде досліджуватись, забезпечувати водночас рівномірність теплового потоку.

2. Знімні панелі виготовляти з металевого каркасу, який наповнено мінеральною ватою, яка витримуватиме температуру в 1 000°C, та листа із нержавіючої сталі.

3. Відповідно до виконаних розрахунків мінімально можлива висота розташування отвору для відведення продуктів горіння 0,8 м, який рекомендовано розташовувати у нижньому положенні стіни вогневої печі по центру (див. рис. 5.2.).

4. Для створення відповідного температурного режиму у камері вогневої печі рекомендовано використовувати газ – це більш екологічно чисте паливо і в ньому міститься набагато менше шкідливих речовин, зокрема CO₂ (менше майже у два рази). Для рівномірного прогрівання камери вогневої печі газ рекомендовано подавати за допомогою двох газових балонів з редукторами, які необхідно встановити на безпечну відстань від вогневої установки.

5. Пристрій, який використовують для спалювання газоподібного палива, – пальник газоповітряний з довжиною пальника ≤ 715 мм, діаметром сопла ≤ 76 мм, кількість – 2 шт.

6. Для контролю температурного режиму у камері вогневої печі та у досліджуваному фрагменті необхідно встановити термопари з діапазоном вимірювання температури від 0 до 1 300°C та термістори з

діапазоном вимірювання температури від 30 до 300°C, кількість визначають залежно від виду досліджуваного фрагмента. Рекомендовані місця розташування датчиків контролю температури у фрагменті несучої залізобетонної стіни описано у розділі 4.

7. Для зняття цифрових значень температури рекомендовано використовувати спеціальний технічний вимірювальний засіб, який дозволяє вимірювати температуру з чутливістю в 0,25 °С, він враховує температуру холодних спаїв й автоматично вносить поправки у значення вимірювання температури, та одночасно транслює температуру у камері вогневої печі, досліджуваному фрагменті на засоби комп'ютерної техніки (ноутбук). Приклад такого вимірювального засобу описано у розділі 3.

Ці рекомендації можуть варіюватися залежно від цілей дослідження, обмежень бюджету та доступності технологій.

5.3. Вимоги щодо створення фрагментів залізобетонних несучих конструкцій для виконання експериментальної частини удосконаленої методики оцінювання межі вогнестійкості

Для виконання експериментального дослідження необхідно виготовити як мінімум 3 фрагмента несучих залізобетонних будівельних конструкцій, щоб перевірити відтворюваність отриманих даних температури.

Фрагмент залізобетонної несучої стіни рекомендовано виготовляти за допомогою стандартної розбірної опалубки, витримуючи елемент конструкції в ній впродовж 7 діб, а після розпалубки фрагмент необхідно зберігати протягом 28 діб в закритому приміщенні та нормальних умовах температури і вологості до початку експерименту.

Пропорції виготовлення фрагментів стін зазначено у розділі 3.

Дозування складових рекомендовано виконувати за допомогою вагових дозаторів, які будуть забезпечувати високу точність вимірювання маси компонентів бетонної суміші. Це важливо для отримання консистентної та якісної суміші. Перемішувати бетонну суміш потрібно за допомогою бетономішалки, а ущільнювати її необхідно глибинними вібраторами.

З метою посилення міцності залізобетонної стіни необхідно використовувати арматуру: основну та допоміжну. Основна арматура може бути розташована як у вертикальних, так і у горизонтальних напрямках залежно від призначення стіни. Допоміжну арматуру використовують для підсилення місць зі збільшеними напруженнями, наприклад, в ділянках зі змінною товщиною стіни. Це допомагає запобігти тріщинам та руйнуванню під час теплового впливу на стіну. Під час обирання та розміщення арматури слід керуватися інженерними розрахунками та вимогами стандартів будівельних норм.

Вологість зразків має бути врівноваженою з навколишнім середовищем із відносною вологістю від 45 до 75 %, можливе природне або штучне сушіння зразків за температури повітря, що не перевищує 60 °C.

Також відповідно до [1] на обігрівальній поверхні досліджуваної конструкції необхідно встановити щонайменше одну термопару на 1 м², але не менше п'яти.

Відповідно до експериментального дослідження та отримання достатніх даних для виконання подальшого розрахунку на рис. 5.3. відображений приклад схеми розташування датчиків контролю температури у досліджуваному фрагменті.

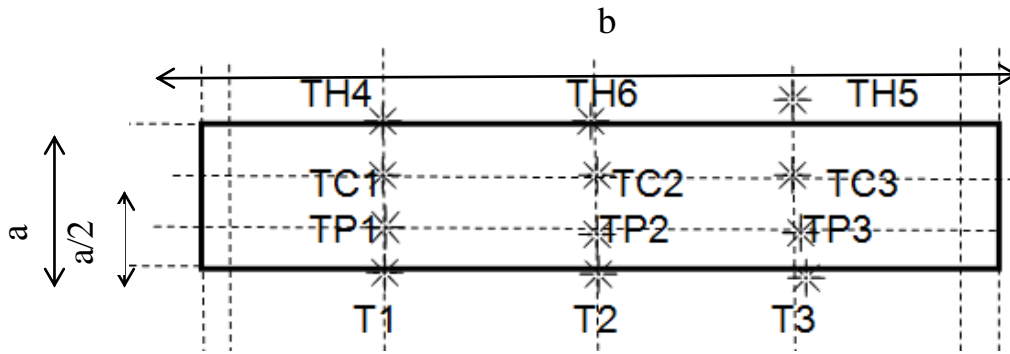


Рисунок 5.3. Приклад схеми розташування датчиків контролю температури у досліджуваному фрагменті: T_1 , T_2 , T_3 – термопари, встановлені на обігрівальній поверхні; TP_1 , TP_2 , TP_3 – термопари на рівні арматури; TH_4 , TH_5 , TH_6 – терморезистори на необігрівальній поверхні з діапазоном вимірювання температури від 5 до 300 °C ; TC_1 , TC_2 , TC_3 – терморезистори посередині перерізу стіни

Розташування датчиків контролю температури у залізобетонній стіні повинно відповідати основним вимогам для ефективного та точного вимірювання температури. Ось кілька основних вимог, які слід враховувати.

1. Для отримання повної інформації про температурний режим у стіні рекомендують розташовувати датчики на різних глибинах, тобто на рівні арматури, ближче до поверхні та в середині перерізу стіни.

2. Датчики повинні бути розташовані рівномірно по всій площі стіни для забезпечення репрезентативного вимірювання температури. Це допомагає виявляти нерівномірні температурні розподілення та ідентифікувати гарячі або холодні зони.

3. Розташування датчиків повинно бути таким, щоб мінімізувати вплив на міцність та структурну цілісність стіни.

Вимоги щодо розташування датчиків контролю температури у будівельній конструкції можуть варіюватися залежно від типу конструкції та відповідних стандартів і вимог.

5.4. Алгоритм виконання експериментального дослідження з нагрівання на прикладі несучої залізобетонної стіни за стандартним температурним режимом пожежі

До початку експерименту необхідно зафіксувати дату виконання, температуру та вологість повітря, заміряти габаритні розміри зразка та його товщину.

Для виконання експериментального дослідження з нагрівання залізобетонної стіни у створеній малогабаритній вогневій установці для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції необхідно виконувати наступні дії.

1. Установити зразок для дослідження до п-подібного огороження печі, встановити фрагмент залізобетонної несучої стіни в передній частині установки, а верхню частину установки закрити знімною панеллю.

2. Розмістити ущільнювач між стінками камери вогневої печі та знімною панеллю.

3. Для створення відповідного температурного режиму необхідно використовувати 2 пальники, які розмістити зверху і знизу дальньої частини установки, щоб не були в контакті один з одним факели полум'я та знаходились в 80 см до випробувального зразка. Для недопущення вивітрювання пічних газів через отвори, які не задіяні в експерименті з прогрівання стін, місця для пальників, які не використовують під час випробування стіни, закласти мінеральною ватою.

4. Датчики контролю температури необхідно встановити у заздалегідь створені отвори відповідно до досліджуваного фрагмента. В третьому розділі було продемонстровано приклад виконання камери установки та розміщення датчиків для замірювання температури. Якщо конфігурацію установки буде змінено, то необхідно виконати додаткові

розрахунки за допомогою комп'ютерного моделювання і розмістити відповідно до отриманих результатів. Рекомендації і приклад розміщення датчиків контролю температури описані у третьому розділі.

5. Далі запалюємо пальники, які встановлено у отвори для пальників, та за допомогою подавання газу з газового балону всередині камери печі створюється заданий температурний режим. В нижній частині камери печі розміщено отвір для відведення продуктів горіння. Контроль температури досліджуваного зразка здійснюють за допомогою спеціальних технічних засобів, а результати вогневих експериментів оброблюють відповідно до чинних стандартів. Таким чином отримуємо експериментальні дані, які лягають в основу розрахункової методики, та відповідно визначаємо фактичну межу вогнестійкості.

В цілому, виконання описаного алгоритму дозволяє здійснити експериментальне дослідження теплового впливу пожежі на несучу залізобетонну стіну та отримати експериментальні дані для подальшого оцінювання межі вогнестійкості конструкції розрахунковим шляхом і відповідно вдосконалення конструкцій й нормативно-технічної бази.

5.5 Необхідний результат експериментального дослідження для оцінювання межі вогнестійкості на прикладі несучих залізобетонних стін

Під час виконання експериментального дослідження з нагрівання фрагмента несучої залізобетонної стіни температура в печі повинна відповідати вимогам, які регламентовані стандартом. Для прикладу в третьому розділі описано, що в момент досягнення значення 980 °C на 28-ій хвилині було встановлено стаціонарний режим за допомогою регулювання потужності нагрівання камери печі. Експеримент з нагрівання фрагмента несучої залізобетонної стіни тривав 60 хв. Але час виконання експерименту визначають відповідно до конструкції, яку

досліджують, та відповідно яка властива для неї межа вогнестійкості, якщо це, наприклад, конструкція, якій достатньо 180 хв, тоді і експериментальні дані потрібно на кожній хвилині експерименту протягом зазначеного часу.

Після виконання експериментального дослідження з нагрівання стіни для подальшого розрахунку оцінювання межі вогнестійкості розрахунковим шляхом необхідно отримати та встановити дані, що описані нижче.

1. Візуальним оглядом необхідно встановити, чи не відбулося втрати цілісності, теплоізолювальної і несучої здатності зразка.

2. Необхідно мати дані про залежність температури в різних точках залізобетонної стіни від часу в процесі експерименту. Це може бути представлено у вигляді графіка, де по горизонтальній осі відкладений час, а по вертикальній осі – температура.

3. Прогрівання конструкції на всіх рівнях повинне бути рівномірним у площинах розміщення термопар, приклад розміщення датчиків контролю температури відображено на рис. 5.3 для виконання експериментального дослідження з нагрівання залізобетонної несучої стіни.

4. Температура на необігрівальній поверхні не повинна перевищувати 140 °С.

5. Необхідно знати клас бетону та арматури з обігрівальної сторони та не обігрівальної, її діаметр та крок.

6. Необхідно заміряти довжину, товщину та товщину захисного шару залізобетонної несучої стіни.

7. Вказати запроєктоване навантаження на конструкцію.

Ці отримані результати експериментального дослідження будуть використані для виконання подальших розрахунків оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних несучих стін.

РОЗДІЛ 6. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ, ПРОВЕДЕНИХ У МАЛОГАБАРИТНІЙ ВОГНЕВІЙ УСТАНОВЦІ

6.1. Методика відновлення температурних полів

Методику використовують для оцінювання межі вогнестійкості елементів будівельних конструкцій, зокрема тих, які підпадають під вплив теплового потоку за умови одностороннього нагрівання.

На основі отриманих результатів експериментального дослідження необхідно закласти основні дані, які детально описані у розділі 4, в Excel, а потім перенести в Mathcad (рис. 6.1 – 6.2.).

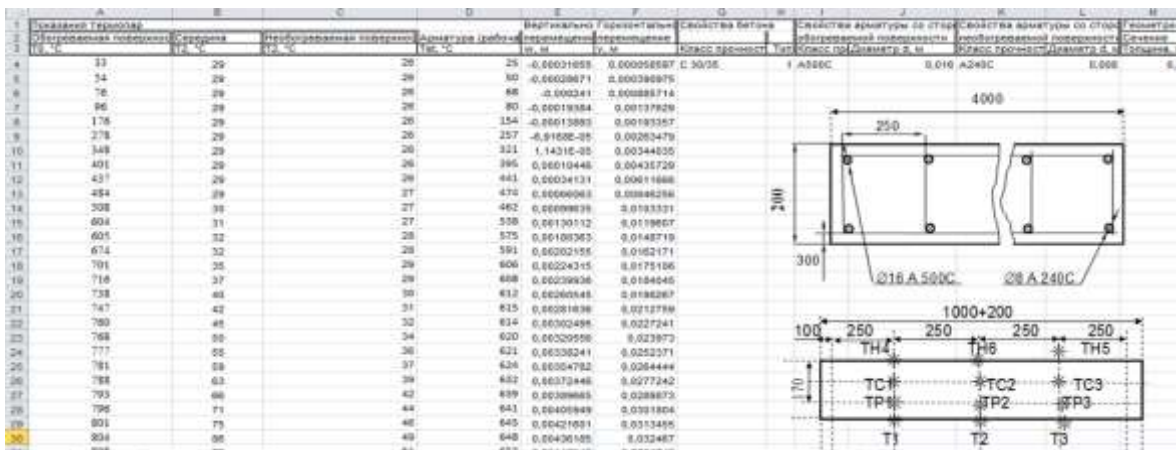


Рисунок 6.1. Сторінка введення початкових даних в Excel

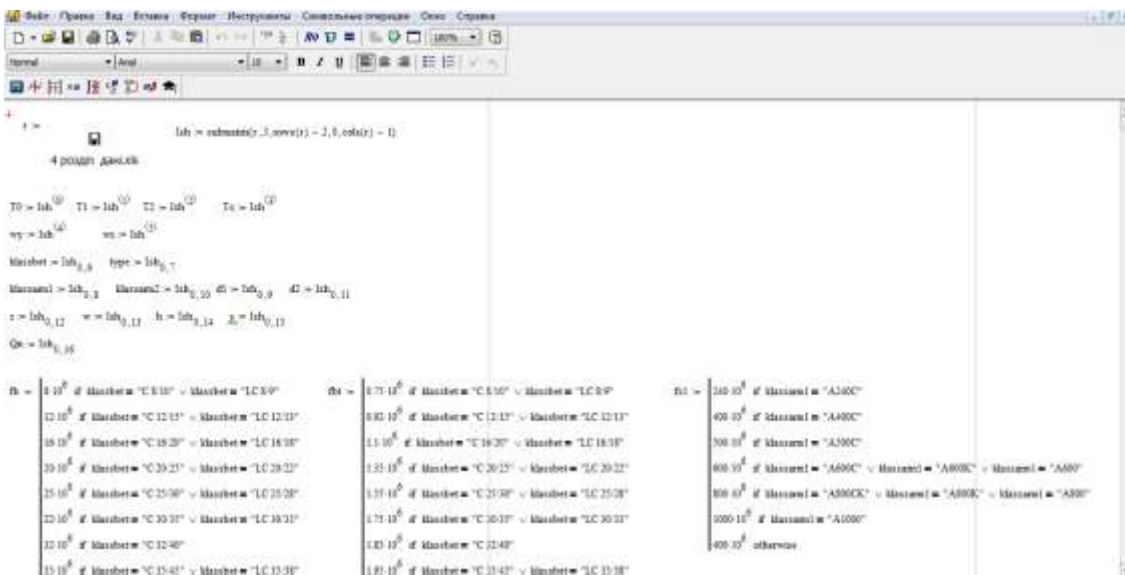


Рисунок 6.2. Лістинг першої сторінки Mathcad

6.2. Розрахунок міцності бетону на прикладі фрагмента несучої залізобетонної стіни на основі теплових значень за удосконаленою методикою

Для розв'язування задачі міцності використовують зонний метод, який полягає у розділенні перерізу стіни на зону, яка опирається механічним навантаженням на рівні ненагрітого бетону та ушкодженої зони, яка не здатна опиратися силовій дії механічного навантаження. Для цього необхідно виконати описані нижче дії.

1. Характеристики залізобетону необхідно взяти з рекомендацій [12], які залежать від температури його нагрівання.

2. На n паралельних зон однакової товщини поділити половину товщини перерізу, де $n \geq 3$.

2. Визначати середню температуру для кожної із зон.

3. За діаграмою зниження міцності бетону залежно від температури для кожної із зон визначити відповідний коефіцієнт зниження опору на стиск $k_c(\theta_i)$.

4. Визначити коефіцієнт $(1 - 0,2/n)$, який враховують під час розрахунку зміни температури кожної зони за формулою (4.12) та середній коефіцієнт зниження опору на стиск, для перерізу елемента.

5. Далі необхідно визначити ширину пошкодженої зони перерізу для стін із стискальними навантаженнями, формула (4.13).

За отриманими значеннями максимальних моментів будують графік зниження несучої здатності залізобетонної стіни із зазначеними характеристиками. Цей графік зображено на рис. 6.4.

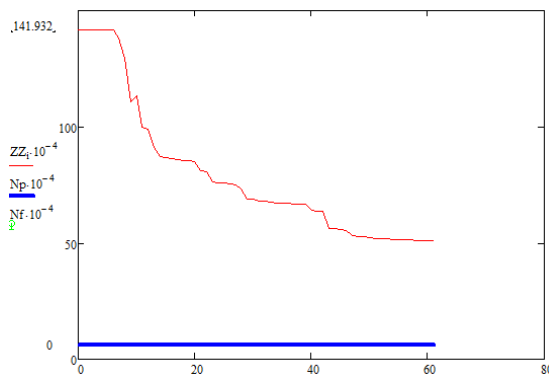


Рисунок 6.4. Графік зниження несучої здатності стіни з розподіленим навантаженням 300 т

На рис. 6.4. показані отримані результати. Ці стіни відповідали характеристикам досліджуваного зразка та температурам прогрівання її шарів під час експерименту. У результаті виконаного розрахунку було визначено, що за 60 хв межа вогнестійкості не наступає, а ресурс несучої здатності – 31 %, тобто стіна перевищує допустимий запас міцності на 31 %.

6.3. Аналіз точності результатів оцінювання межі вогнестійкості на прикладі несучих стін за удосконаленим експериментально-розрахунковим методом

Перевіряння адекватності виконаних експериментів необхідно для визначення, на скільки експерименти здатні до відтворення результатів, тобто переконатися в достовірності та точності отриманих даних, та чи відповідають випробування встановленим вимогам стандартів. Це важливо для забезпечення надійності і якості матеріалів, які були піддані вогневим випробуванням. Некоректне перевіряння може призвести до недостовірних висновків.

Щоб перевірити адекватність отриманих експериментальних даних, необхідно виконати три ідентичних випробування з нагрівання

одночасно виготовлених стін у вогневій установці, що підтвердить достовірність та стабільність отриманих результатів. Виконання мінімум трьох вогневих експериментів має переваги з точки зору статистичної достовірності. Коли виконують більше двох експериментів, відповідно тоді можна зробити статистичний аналіз, щоб оцінити рівень значущості відхилень між розрахунковими та експериментальними значеннями.

Відповідно до робіт [34, 91, 110] доцільно перевірити адекватність виконаних експериментів. Для цього необхідно розрахувати відносну, абсолютну похибки експериментальних даних та для послідовного порівняння дисперсій показів температур кожного датчика контролю температур, які розташовані у досліджуваному фрагменті, з дисперсією відтворюваності експериментальних досліджень.

За допомогою F-критерію Фішера необхідно перевірити гіпотезу про рівність генеральних дисперсій, розподіл температур на кожній хвилині експерименту відповідно до формули (3.7.).

Для того, щоб розрахувати дисперсію адекватності, яку виконують на основі отриманих даних з нагрівання стін у вогневій установці, як відхилення між показами конкретної термопари та середнього значення температур всіх трьох експериментів відповідного їй місця замірювання температур, необхідно використовувати формулу (3.8).

Дисперсію відтворюваності розраховують як відхилення температури конкретної термопари та середнього значення температури по всіх дослідах у місцях її розташування з урахуванням похибки термопар відповідно до формули (3.9).

Відповідно до виконаних розрахунків отримуємо абсолютне та відносне відхилення і критерій адекватності (F-критерій Фішера), що підтверджує або не підтверджує адекватність експериментальних даних.

У третьому розділі наведено приклад подібної перевірки, де відповідно до отриманих даних виконаного експериментального

дослідження розраховано відносно і абсолютну похибки та відповідно (F-критерій Фішера).

Адекватність розрахунку температурного поля у фрагментах несучих залізобетонних стін може бути оцінена на основі порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними. Для цього необхідно виконати експериментальне дослідження, де вимірюють температуру в різних точках стіни і порівнюють зі значеннями, отриманими з розрахункової моделі.

Якщо розрахункові значення температур відповідають експериментальним даним з прийнятною точністю, то можна стверджувати, що розрахунок температурного поля у фрагментах несучих стін є адекватним. Однак, якщо виявлено значні відхилення між розрахунковими та експериментальними значеннями, то може бути необхідно переглянути вживані припущення та моделі, а також здійснити додаткові експерименти для виявлення можливих причин таких відхилень.

Метод апроксимації температурних розподілів на основі точкових замірів температури, отриманих під час нагрівання несучої залізобетонної стіни за стандартним температурним режимом пожежі, описано у четвертому розділі.

Розрахунок виконують за аналогічними формулами (3.8) – (3.9), але дисперсію адекватності розраховують як безпосереднє відхилення у цій точці.

Дисперсія відтворюваності повинна враховувати розрахункову похибку не тільки між отриманими розрахунковими даними, а і між трьома експериментами.

Для оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій удосконаленим експериментально-розрахунковим методом відповідно до вищезазначеної схеми необхідно виконати зазначені дії.

1. Фрагмент несучих залізобетонних будівельних конструкцій, який встановлюють в камеру вогневої печі для нагрівання.

1.1. Вимоги щодо виготовлення зразка відповідно до вимог замовника, де враховано товщина, товщина захисного шару, висота конструкції, тип та клас бетону, його густина та діаметри основної і допоміжної арматур.

1.2. Врахування вимог щодо мінімальних розмірів зразків-фрагментів, які регламентовано стандартами, щодо методів випробування на вогнестійкість конструкцій конкретних типів.

1.3. Підготовка зразка до випробування: встановлення фрагмента несучих залізобетонних будівельних конструкцій для дослідження теплового впливу пожежі на залізобетонні будівельні конструкції у малогабаритну вогневу установку, розміщення датчиків контролю температури у камері вогневої печі та у досліджуваному фрагменті.

2. Створення удосконаленої малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції з відповідними отворами для пальників, отвором для відведення продуктів горіння та паливною системою для створення температурного режиму, який регламентований стандартом.

2.1. Врахування вимог щодо створення конструкції малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції: мінімально необхідні габаритні розміри, п-подібна форма печі та створення двох знімних панелей, що дають можливість досліджувати основні типи залізобетонних конструкцій.

2.2. Вимоги щодо засобів для створення відповідного температурного режиму. Розміщення пальників впливає на рівномірність розподілу температури по обігрівальній поверхні досліджуваного фрагмента будівельної конструкції. Для цього 2 пальники необхідно розмістити у визначені отвори відповідно до конструкції, що досліджують.

2.3. Врахування вимог щодо налаштування системи подавання палива. Для цього необхідно під'єднати до пальників два газові балони з регулювальним апаратом та розмістити їх на безпечній відстані.

3. Виконання експерименту з нагрівання фрагмента несучих залізобетонних будівельних конструкцій у створеній малогабаритній вогневій установці.

3.1. До початку виконання експерименту необхідно встановити термомпари й терморезистори у камері вогневої печі та у досліджуваному фрагменті відповідно до попередньо розробленої схеми розташування датчиків контролю температури для можливості контролю температури в реальному часі.

3.2. Отримання експериментальних даних та оброблення результатів. Відповідно до виконаного експериментального дослідження отримуємо дані датчиків контролю температури у визначених місцях. Також візуальним оглядом необхідно встановити, чи відбулась втрата цілісності, теплоізолювальної чи несучої здатності зразка.

Для виконання розрахункової частини необхідно підготувати наступні дані: параметри матеріалів, що досліджувались, габаритні розміри несучих залізобетонних будівельних конструкцій та дані щодо отриманих замірів температури на кожній хвилині у необхідних місцях контролю температури.

4. Виконання інтерполяції температур на основі отриманих даних з нагрівання фрагмента несучих залізобетонних будівельних конструкцій у малогабаритній вогневій установці.

4.1. Необхідно ввести основні дані в таблицю Excel, такі, як висота, товщина, товщина захисного шару досліджуваної конструкції, клас міцності арматури та бетону, діаметри арматури, тип крупного заповнювача бетону, розташування та кількість стержнів, які показано на рис. 4.7., дані щодо геометричних розмірів перерізу стіни, розрахункова довжина стіни та розподілене навантаження, а потім перенести ці дані в Mathcad.

4.2. Обрати математичну модель для виконання інтерполяції температур та розрахувати розподіл температури у перерізі несучих залізобетонних будівельних конструкцій на кожній хвилині випробування на основі точкових замірів температур у середині стіни в процесі нагрівання у печі.

5. Виконання розрахунку задачі міцності фрагмента несучих залізобетонних будівельних конструкцій на основі отриманих теплових значень.

5.1. Для виконання розрахунку міцності необхідно обрати математичну модель відповідно до необхідної точності та підготовленості оператора і виконати розрахунок напружено-деформованого стану стіни за умови сумісної дії теплового та механічного навантаження з урахування габаритів реальної конструкції.

6. Оцінювання межі вогнестійкості фрагмента несучих залізобетонних будівельних конструкцій на основі отриманих експериментальних даних розрахунковим шляхом.

6.1. Встановити запас міцності у разі недосягнення межі вогнестійкості.

6.2. Підготувати висновок (звіт) про отримані результати межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій на основі виконаного удосконаленого експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій.

В цьому розділі було розглянуто схему, в основі якої лежать 6 основних етапів методики та 13 додаткових. Відповідно до вищеописаної удосконаленої схеми оцінювання межі вогнестійкості експериментально-розрахунковим шляхом можливо встановити фактичну межу вогнестійкості несучих залізобетонних стін.

ВИСНОВКИ

У монографії представлено результати розв'язку науково-прикладного завдання щодо обґрунтування створення засобів з оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій без прикладання механічного навантаження під час нагрівання, а саме малогабаритних вогневих печей, описано процес будівництва такої установки, а також розроблено методики експериментальних досліджень та подальшого аналітичного розрахунку міцнісних характеристик залізобетонних будівельних конструкцій.

На основі отриманих даних було сформовано такі висновки:

1. На основі аналізу актуальних наукових публікацій та вимог нормативних документів з оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій виявлено, що експериментальні, розрахункові та експериментально-розрахункові методи оцінювання межі вогнестійкості мають недоліки. Ці недоліки було проаналізовано та виділено шляхи удосконалення найперспективнішого з них, а саме експериментально-розрахункового методу.

2. У процесі досліджень було встановлено, що для комп'ютерного моделювання та подальшого удосконалення реальної установки можливо використовувати 2 програмних комплекси FDS та FlowVision, за рахунок їхнього використання визначено рівномірний розподіл температури у камері вогневої печі та найменш можливі розміри внутрішнього простору камери печі від 1 м³ до 2 м³.

3. З метою удосконалення малогабаритної вогневої установки розроблено систему метрологічного забезпечення для виконання вогневих випробувань, яка одночасно визначає температуру в середині камери вогневої печі та у досліджуваному фрагменті і транслює отримані результати на засоби комп'ютерної техніки (ноутбук). Тому було

створено модуль аналого-цифрового перетворення сигналу термопар, який має 12 шт. термопар та термісторів, але може містити до 56 датчиків контролю температури.

4. Використовуючи удосконалену малогабаритну вогневу установку для дослідження теплового впливу на будівельні конструкції, виконано експериментальні випробування несучих залізобетонних будівельних конструкцій без дії механічного навантаження, отримано експериментальні дані для виконання подальшого розрахунку міцності.

5. Підтверджено адекватність експериментальних даних на підставі отриманої інформації, внаслідок експериментів з нагрівання малогабаритних фрагментів несучих залізобетонних будівельних конструкцій: розраховані критерії адекватності (F-критерій Фішера) нижче за критичне значення, а відносне відхилення не перевищило 3 %.

6. Описано алгоритм виконання випробувань несучих залізобетонних будівельних конструкцій у малогабаритній вогневій установці, за допомогою якого отримуємо удосконалену експериментально-розрахункову методику.

7. Обґрунтовано удосконалену експериментально-розрахункову методику оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій на основі випробування їхніх фрагментів у малогабаритних вогневих печах та подальшого розрахунку. Також за її допомоги виконано оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій за несучою здатністю за умови застосування розрахунку на міцність на основі отриманих експериментальних даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

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). ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги.
2. Захист від пожежі. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість. ДСТУ Б В.1.1-19-2007. [Чинний від 2007-06-15.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 29 с – (Національний стандарт України).
3. ISO 834-75 Fire resistance test. Elements of building constructions. European Committee for Standardization, Brussels, 2000.
4. EN 13501-1:2002 “Fire classification of construction products and building elements” – Part 1.2. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
5. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
6. ДБН В.1.1-7-2016. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
7. Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги.: ДСТУ Б В.1.1-18:2007 – [Чинний від 01.04.2008]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 13 с. – (Національний стандарт України).
8. Була С. С., Бойко Р. О. (2013). Історія та перспективи розвитку повномасштабних натурних вогневих випробувань. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва, (755), 21-30.
9. J. R. Lawson A History of Fire Testing / J. Randall Lawson. – Gaithersburg : U.S. Department of Commerce, 2009. – 41 p.

10. Демчина Б. Г. Вогнестійкість одно- і багатошарових просторових конструкцій житлових та громадських будівель: дис. доктора техн. наук: 05.23.01 / Демчина Богдан Григорович – К., 2002. – 367 с.

11. Шналь Т. М. Повномасштабні пожежні випробування фрагмента великопанельної будівлі / Т. М. Шналь, М. С. Коваль, Б. Г. Демчина, П. М. Коваль, І. І. Кархут // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Теорія і практика буд-ва. – 2008. – № 627. – С. 208–212.

12. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій / Шналь Тарас Миколайович. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 176 с.

13. Сідней С. О. Підвищення достовірності результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін. Дисертаційне дослідження. 2016.

14. Поздєєв, С. В., Отрош, Ю. А., Омельченко, А. М., & Щіпець, С. Д. (2014). Методика оцінки межі вогнестійкості залізобетонних балок шляхом інтерпретації результатів їх вогневих випробувань. Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету, (1), 119-127.

15. ДСТУ-Н П Б В.2.6-XX: 20XX Настанова проектування залізобетонних конструкцій Основні положення “Вогнестійкість” (EN 1992-1-2:2004, MOD). – К., Мінрегіонбуд України, 2010. – 120 с.

16. ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 - Єврокод 1. Дії на конструкції. Ч. 1–2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житловокомунального господарства України, 2011. – 80 с.

17. Perehin A., Nuianzin O., Shnal T., Shchipets S., Myroshnyk O. Improvement of means for assessing fire resistance of fragments of reinforced concrete structures. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 2684, No. 1). AIP Publishing, 2023.

18. Була С. С.; Бойко Р. О.; Горбачевський Р. Р. Аналіз методів розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Збірник наукових

праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво, 2012, 5: 54-59.

19. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.

20. Глушаниця А. І. Напружено-деформований стан зігнутих елементів у сталезалізобетонних конструкціях з'єднаних за допомогою склеювання. 2016.

21. Будівельні матеріали і конструкції підземних споруд. Основи розрахунку [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С. М. Стовпник, А. Л. Ган., Л. В. Шайдецька. – Електронні текстові дані (1 файл: 10,7 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 120 с.

22. Григор'ян Б. Б. Вогнестійкість стиснутих залізобетонних елементів при температурних режимах пожежі, близьких до реальних. 2001.

23. Поздеев С. В. Дослідження поведінки залізобетонної стіни в умовах пожежі за допомогою методу кінцевих елементів. Пожежна безпека: теорія і практика, 2014, 17: 85-92.

24. Ларбі, Ель Мутассім, et al. Вогнестійкість монолітних залізобетонних конструкцій будівель. 2001.

25. Ruvalcaba Ayala F.R. Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy. – 2010. – 294 p.

26. Пазен О. Ю. Математичне моделювання процесів теплопереносу в багат шарових плоских конструкціях за умов пожежі. 2015.

27. Lie T.T. Characteristic temperature curves for various fire severities. "Fire Technol", 1974, 10, № 4. – P. 315–326.

28. Lie T.T. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members. International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety, 22/23, February 1983/pp.139-153.

29. Shah, Tasneem M. An analysis and comparison of tube natural frequency modes with fluctuating force frequency from the thermal cross-flow fluid in 300 MWe PWR / Shah, Tasneem M.; Sadaf Siddiq, Zafar U. Koreshi / International Journal of Engineering and Technology 9 (9): 201–205.

30. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності математичних моделей теплопередачі для розв'язку теплотехнічної задачі при визначенні вогнестійкості залізобетонних конструкцій / Поздєєв С.В., Тищенко О.М. // Черкаси: Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 5. – 2010. – С. 122-129.

31. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних плит. / Поздєєв С.В. // Черкаси: Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 6. – 2010. – С. 125-133.

32. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності вогнезахисної обробки залізобетонних балок покриттями, що спучуються. / Поздєєв С.В. // Вісник житомирського державного технологічного університету. – Житомир: ЖДТУ, 2010. - №3(54). – С.12 – 16.

33. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних балок. / Поздєєв С.В. // Пожежна безпека : [зб. наук. праць]. – Л.: ЛДУБЖД. – № 17. – 2010. – С. 115–122.

34. Поздєєв С.В. Дослідження адекватності результатів математичного моделювання тепломасообміну у вогневій печі при випробуваннях залізобетонної плити на вогнестійкість. / Поздєєв С.В. // Черкаси: Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика.

Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Випуск № 6/1. – 2010. – С. 60 – 65.

35. Поздєєв С.В. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. / Поздєєв С.В., Левченко А.Д. // Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка». – Львів: НТУ «Львівська політехніка». - 2011. – С. 264 - 269

36. Поздєєв С. В.; Словінський В. К.; Щіпець С. Д. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань. Пожежна безпека: теорія і практика, 2013, 14: 88-93.

37. Щіпець С. Д. Метод визначення температурних полів у перерізах несучих стін за результатами їх випробувань на вогнестійкість. Науковий вісник УкрНДІПБ, 2014, 1: 79-84.

38. Отрош Ю. А., Поздєєв С. В., Демешок В. В., Кропива М. О. Оцінка вогнестійкості ненесучих стін за розрахунковими методами Єврокоду. 2015.

39. Нуянзін О. М., Заїка П. І., Черниш Р. А., Ведула С. А. Розрахункова оцінка межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2022. № 6 (2). С. 82-94.

40. Нуянзін О. М., Діденко В. В. Уточнений метод розрахункової оцінки межі вогнестійкості залізобетонної плити. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 131–134.

41. Krukovsky, P.G., Tadya, O.Yu. (2007). Identifiability of the parameters of the thermal regime model of a typical tworoom apartment structure. Industrial Heat Engin., (5), 54–63.

42. Kachkar, E.V. (2010). Identifiability of the parameters of the thermal state model of sandwich panels with mineral wool boards. *Problems of Fire Safety*, (27), 70–76

43. Метрологічні особливості вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість / С. В. Поздєєв, О. М. Тищенко, О. М. Нуянзін [та ін.] // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2011. – № 8. – С. 73–79.

44. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. ДСТУ 2272:2006. [Чинний від 2006-10-01]. – К. : Держспоживстандарт України 2006. – 30 с. – (Національний стандарт України).

45. WILCOX, David C., et al. *Turbulence modeling for CFD*. La Canada, CA: DCW industries, 1998.

46. H.R. Baum and K.B. McGrattan. *Simulation of Large Industrial Outdoor Fires*. In *Fire Safety Science– Proceedings of the Sixth International Symposium*. International Association for Fire Safety Science, 2000.

47. Mdx.plm.automation.siemens.com [Електронний ресурс]: [Інтернетпортал]. – Електронні дані. – [5800 Granite Parkway, Suite 600, Plano, TX 75024 USA]. – Режим доступу: <https://mdx.plm.automation.siemens.com>.

48. Сохацький А. В. Порівняння нових та відомих методик розв'язку рівнянь Нав'є – Стокса в змінних вихор-функція течії в криволінійній неортогональній системі координат / А. В. Сохацький // Придніпровський науковий вісник. – Дніпропетровськ : Дніпропетровський державний університет. – 1996. – № 4. – С. 20.

49. Сохацький А. В. Неявна факторизована схема апроксимації рівнянь Нав'є – Стокса в змінних вихор-функція течії // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. – Севастополь : Сев. ГТУ, 1996. – С. 51.

50. Бударин В. А. Аналіз прихованих властивостей системи Нав'є – Стокса / В. А. Бударин // Тез. доп. 6 Мінськ. міжнар. форум, ІТМО. – 2008. Т. 1. – С. 75–7

51. Нуянзін О. М. Підвищення ефективності випробувань на вогнестійкість горизонтальних елементів залізобетонних будівельних конструкцій. 2014.

52. Будівельні матеріали. матеріали будівельні. Методи випробувань на горючість. ДСТУ Б В.2.7-19-95 (ГОСТ 30244-94). [Чинний від 1996-09-01]. – К. : Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1995. – 32 с. – (Національний стандарт України).

53. Harmathy T.Z. Fire resistance versus flame spread resistance. – Fire Technol., 1976, v. 12, N 4. – P. 290–302.

54. Anderson John D. (1995) Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications. Science/Engineering/Math. McGraw-Hill Science

55. Patankar Suhas. (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science. Taylor & Francis. ISBN 0-89116-522-3

56. Ansys Release 10, inc. Theory Reference.

57. Nuianzin O., Tyshchenko O., Zhartovskyi S., Zaika P., Peregin A. The research of carrying capacity of reinforced concrete walls under uneven warming. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2019. T. 708. №. 1. C. 012063.

58. Milarcik E. L An Analysis of the Performance of Residential Smoke Detection Technologies Utilizing the Concept of Relative Time / E. L. Milarcik, S. M. Olenick, R. J. Roby // The National Fire Protection Research Foundation Suppression and Detection Research and Applications Symposium (SUPDET), March, 2007. (2007 Carey award).

59. Olenick S. M. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke / S. M. Olenick, D. J. Carpenter // Journal of Fire Protection Engineering. – 2003. – № 13. – S. 87–110.

60. Голубєв С. О. Лебідь О. Г. & Черній Д. І. (2019). Засоби комп'ютерного моделювання в галузі обчислювальної гідродинаміки. Математичне моделювання в економіці, (2), 21-38.

61. McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., & Overholt, K. (2013). Fire dynamics simulator user's guide. NIST special publication, 1019(6), 1-339.

62. Перегін А. В., Нуянзін О. М., Сідней С. О., Ребедь В. І «Основні параметри побудови комп'ютерної моделі кабельного тунелю в середовищі FDS» IX Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. – 282 с.

63. Поздєєв С. В., Нуянзін, О. М. Математичні моделі теплообміну для удосконалення метрологічних особливостей вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість. Пожежна безпека–2011: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, 17-18 листопада 2011р.–Харків: НУЦЗ України, 2011.–372 с.

64. Перегін, А. В., Нуянзін, О. М., Кришталь, М. А., Заїка, П. І. (2020). Комп'ютерне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, 4(1), 71-79.

65. Ніжник В.В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти. 2020.

66. 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.

67. Математичне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін / Нуянзін О. М., Поздєєв С.В., Нуянзін В. М., Сідней С. О., // Пожежна безпека: теорія і практика, 2015. – № 20.

68. Математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні у ній повномасштабних вогневих

випробувань / Т. М. Шналь, С. В. Поздєєв, Р. С. Яковчук, О. В. Некора, С. О. Сідней, // Пожежна безпека, 2020

69. 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.

70. Перегін А. (2022). Дослідження впливу конфігурації та параметрів вогневих печей на умови нагрівання несучих стін за стандартним температурним режимом пожежі. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, 6(1).

71. Перегін А. В., Нуянзін, О. М. (2021). Моделювання комп'ютерної моделі вогневої печі за допомогою системи автоматизованого проектування. Збірник XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій», 162.

72. Сідней, С. О. (2015). Чисельне дослідження ефективності випробувань на вогнестійкість несучих стін у вогневих печах різної конфігурації. Пожежна безпека: теорія і практика, (19), 106-111.

73. Нуянзін, О. М., Кришталь, М. А., Кришталь, Д. О., & Рога, М. П. (2017). Дослідження рівномірності прогріву несучої стіни в залежності від конструкції та дизайну вогневої печі. Вісті Донецького гірничого інституту, (1), 66-72.

74. ДСТУ EN 1363-1:20_ (EN 1363-1:2020, IDT) «Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги».

75. Конспект лекцій з дисципліни “Пічне обладнання у хімічних процесах” для студентів напряму 6.050503 Машинобудування: [Електронний ресурс]: /НТУУ „КПІ”; уклад, А.Р. Степанюк. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2016. – 132 с.

76. Belsky V.I., Sergeev B.V. Industrial furnaces and pipes. Textbook allowance for technical schools. Ed. 2nd, corrected and added. M., Stroyizdat. 1974. 301 p.

77. Skoblo A.I., Molokanov Yu.K., Vladimirov A.I., Shchelkunov V.A. Processes and apparatus of oil and gas processing and petrochemistry: Textbook for universities. - 3rd ed., revised. and additional - M.: Nedra-Business Center LLC, 2000. - 677 p.

78. Методичні вказівки до виконання практичних занять з курсу „Енергетичні установки”. Для студентів спеціальності 141 освітньо-професійної програми „Енергетичний менеджмент”/ Укл. Кравченко В.І., Клименко В.В. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017, 32с. – укр. мовою.

79. Наказ Міністерства соціальної політики України № 533 від 05.03.2018 «Про затвердження Правил охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском».

80. ДСТУ ISO/IEC 17025: 2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

81. Згуря В. І. Оцінювання якості проведення випробувань щодо визначення межі вогнестійкості будівельних конструкцій. Збірник наукових праць «Пожежна безпека: теорія і практика». Черкаси, 2009. № 14. С. 32–39.

82. Веселівський, Р Б.; Половко, А. П.; Василенко, О. О. Експериментальне дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій з фібролітовими плитами. Пожежна безпека, 2013, 23: 33-38.

83. Немчинов ю. І., et al. Дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій. Наука та будівництво, 2014, 2: 11-16.

84. Barteleml B., Kryuppa Zh. Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy. - M.: Stroyizdat, 1985. -216s

85. Milovanov A.F. Stoykost zhelezobetonnykh konstruktsiy pri pozhare. -M.: Stroyizdat, 1998. – 304s.

86. Romanenkov I.G., Zigern-Korn V.N. Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy iz effektivnykh materialov. – М.: Stroyizdat, 1984. – [1], 241s., il.; 20sm.].

87. Піч для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій та окремих вузлів їх стикових з'єднань. Пат. 17160 Україна, МПК(2006) F23M5/00. / Б. Г. Демчина, В. С. Фіцик, А. П. Половко, А. Б. Пелех // заявл. 20.03.2006р., опубл. 15.09.2006. – Бюл. № 9.

88. Згуря В.І. Удосконалення системи визначення пожежонебезпечних властивостей речовин, матеріалів та будівельних конструкцій: Автореф. дисерт. канд. техн. наук / В. І. Згуря . – Київ: УкрНДІПБ МНС України, 2007. – 25 с.

89. Perehin A., Nuianzin O., Borysova A., Nuianzin V. Results of Experimental Investigations of Reinforced Concrete Wall Elements According to the Standard Temperature Mode of Fire. *Materials Science Forum: Trans Tech Publications Ltd*, 2022. Vol. 1066. pp. 206-215.

90. Перегін, А., Нуянзін, О. (2021). Етапи створення прототипу вогневої установки для визначення температурних розподілів малогабаритних фрагментів залізобетонних конструкцій. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, 5(2), 75-82.

91. Perehin A., Nuianzin O., Zaika N., Vedula S. (2021). Technique for creating the prototype of a compact fire plant for tests to determine the fire resistance of reinforced concrete structures. *The Scientific Heritage. Hungary*, 2021. № 78 (1). С. 37-43..

92. Методичні вказівки до науково-дослідницької практики з дисципліни «Організація наукових досліджень» (Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень) / І. І. Капцов, О. В. Ромашко, Л. В. Гапонова та ін. – Харків : ХНАМГ, 2009. – 59 с.

93. Статистична обробка даних: навч. посіб. / О.В. Перегуда, О.А. Капустян, О.Б. Курилко.–Електронне видання, 2022.–103 с.

94. Поздєєв С. В. Отрош Ю. А., Федченко І. Г., Нешпор, О. В. Методика оцінювання адекватності результатів визначення меж вогнестійкості залізобетонних балок експериментально-розрахунковим методом. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2014, 1.40: 129-136.

95. Махней О. В. Математичне забезпечення автоматизації прикладних досліджень: Навчальний посібник / О. В. Махней, Т. П. Гой. – ІваноФранківськ: Сімик, 2013. – 304 с.

96. Lykov A. V. Theory of thermal conductivity / A. V. Lykov. - M: Higher school, 1967. - 559 p.

97. STO 36554501-006-2006. organization standard. Rules for ensuring fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures. - M. : FSUE "NIC "Construction", 2006. - 81 p.

98. Strakhov V.L. Optimal design of fire-resistant building structures. / Simulation of fires and explosions [ed. N.N. Brushlinsky and A.Ya. Korolchenko]. - M.: Pozhnauka, 2000. - S. 365 - 442.

99. Roitman V.M. Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings / Roitman V.M.– M.: Association "Fire Safety and Science". 2001. - 382 p.

100. Barthelemy B. Fire resistance of building structures / Barthelemy B., Kryuppa Zh. - M.: Stroyizdat, 1985. - 216 p.

101. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering. – Materiały V Międzynarodowy Konferencji “Bezpieczeństwo pożarowe budowli. – 2005. – С. 141–150.

102. Krukovsky P.G. Inverse Problems of Heat and Mass Transfer (General Engineering Approach) / Krukovskii P.G. - K .: NASU Institute of Technical Thermal Physics, 1998. - 224 p.

103. Поздєєв С. В. Розрахунковий метод оцінки вогнестійкості кам'яних несучих стін. Науковий вісник УкрНДІПБ, 2014, 1: 72-78.

104. Нуянзін, О. М., Гаркавий, С. Ф., Самченко, Т. В., & Кришталь, Д. О. (2018). Дослідження нерівномірності прогріву залізобетонної стіни при

випробуваннях на вогнестійкість. Міжнародний науковий журнал Інтернаука, (13), 59-65.

105. Щіпець С. Д. Удосконалення методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних та кам'яних несучих стін. 2015.

106. Chemical hydrodynamics: a reference guide / A. M. Kutepov, A. D. Polyenin, Z. D. Zapryanov et al. - М. : Kvantum, 1996. - 336 p.

107. Samarsky A.A. Introduction to the theory of difference schemes / Samarsky A.A. - М.: Nauka, 1971. - 554 p.

108. Samarsky A.A. Computational heat transfer / Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. - М.: Editorial URSS, 2003. - 784 p.

109. Vlasova E.A. Approximate methods of mathematical physics: [training. for universities / ed. V.S. Zarubina, A.P. Krishchenko] / Vlasova E.A., Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N. - М. : MSTU im. Bauman, 2001. - 700 p.

110. Perehin, A., Nuianzin, O., Kryshtal, D., Kryshtal, M. Аналіз результатів прогрівання малогабаритного фрагмента залізобетонної стіни під час експериментальних досліджень. Civil security: Public administration and crisis management, Київ, 2022. № 1. С. 19-36.

111. Перегін А. В. Удосконалення методики розрахункової оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі результатів вогневих експериментів. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2023. Том 7 № 1. С. 89-97.

Наукове видання

**А. В. Перегін,
В. М. Гвоздь,
М. А. Кришталь,
Н. Я. Калашник,
О. М. Нуянзін**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
МАЛОГАБАРИТНОЇ ВОГНЕВОЇ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ
ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

МОНОГРАФІЯ

Підписано до друку 29.11.2023.
Обл.-вид. арк. 5. Ум. друк. арк. 10,5.
Замовлення № 32.
ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034