

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Перегін Аліна Вадимівна

УДК 614.841.45

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВОГО
МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТІН**

Спеціальність – 261 Пожежна безпека
Галузь знань – 26 Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



А. В. Перегін

Науковий керівник: **Нуянзін Олександр Михайлович**
кандидат технічних наук, доцент

Черкаси – 2023

АНОТАЦІЯ

Перегін А. В. Удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. – Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, 2023.

Зміст анотації.

Актуальність теми.

Для забезпечення стійкості будівель та споруд під час пожежі необхідно гарантувати, що їхня межа вогнестійкості була не нижчою за нормативну. Це забезпечить необхідний час для евакуації людей та роботи оперативних підрозділів. Тому точність встановленої межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін є одним з найважливіших факторів, так як вони є постійним пожежним навантаженням споруди.

Одним із найбільш поширених методів оцінювання межі вогнестійкості для залізобетонних несучих стін 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 з метою оцінювання є, як мінімум, нераціональним. В таких випадках можливо застосувати розрахункові методи, але вони обмежені загальними характеристиками матеріалу і не враховують особливостей багато композитних складників, не кажучи вже про воду і крупний заповнювач, в тому регіоні де цей елемент виготовляли, а також в'яжучі можуть використовуватись 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.

Аналіз наукових робіт, виконаних у галузі оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій таких дослідників: П. Г. Круковського, С. В. Поздєєва, О. М. Нуянзіна, С. Л. Фоміна, О. В. Некори, С. В. Новака, С. О. Сіднея, В. Bartelemini, G. Kruppa, T. Lie, T. Harmathy, показав, що широко розглянуті методи визначення фактичних меж вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій експериментальним та розрахунковим шляхом, але кожен з них має як переваги, так і недоліки. А також було з'ясовано, що метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін експериментально-розрахунковим шляхом з використанням малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції не був досліджений. Це є фактором стримування для застосування залізобетонних несучих стін, які були випробувані лише в експериментальних печах або тільки розрахунковим методом, та є причиною невідповідності фактичної межі вогнестійкості будівельних конструкцій.

Удосконалення методу оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних несучих стін з використанням малогабаритних вогневих печей за стандартним температурним режимом пожежі без механічного навантаження та подальшого розрахунку міцнісних характеристик з його урахуванням є актуальним науковим завданням, вирішення якого буде науковим підґрунтям підвищення ефективності експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін.

Ідея роботи полягає в удосконаленні експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін для гарантування нормативного часу їхньої стійкості в разі пожежі на основі вогневих випробувань їхніх малогабаритних

фрагментів без навантаження, шляхом урахування особливостей одностороннього нагрівання стін та обґрунтування раціонального розміщення місць точкових замірів температури всередині фрагментів, а також урахування реальних габаритів конструкції на етапі розрахунку.

Об'єкт роботи – процеси нагрівання та деформації несучих залізобетонних стін під час дії стандартного температурного режиму пожежі.

Предметом дослідження є оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін за допомогою експериментально-розрахункового методу.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності методу, що об'єднує експериментальний та розрахунковий підхід до оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін шляхом створення удосконаленого алгоритму, розробки засобів випробувань та обґрунтування розрахункового математичного апарату інтерпретації результатів на реальні об'єкти.

Для досягнення поставлених цілей були сформовані такі завдання:

1. Проаналізувати актуальні наукові праці та нормативні документи щодо вимог з оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін. Визначити шляхи удосконалення експериментально-розрахункового методу.

2. Науково обґрунтувати та створити комп'ютерні моделі для описування процесу тепломасообміну у малогабаритній вогневій випробувальній установці. Визначити шляхи удосконалення конструкції та конфігурації установки.

3. Виконати експериментальні дослідження стандартного температурного режиму пожежі на залізобетонну стіну із застосуванням удосконаленої малогабаритної вогневої установки. Перевірити адекватність отриманих результатів.

4. Обґрунтувати алгоритм та виконати розрахунок напружено-деформованого стану залізобетонної стіни на основі результатів отриманих експериментальних досліджень.

5. Розробити удосконалений експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін на основі випробування їхніх досліджуваних фрагментів у малогабаритних вогневих установках та проведення подальшого розрахунку міцності.

Наукова новизна дисертації полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання щодо підвищення ефективності процесу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін шляхом наукового обґрунтування та подальшого удосконалення для експериментально-розрахункового методу її визначення з урахуванням особливостей застосованих матеріалів під час експериментів та механічного навантаження у процесі розрахунку.

Отримані такі основні наукові результати:

При цьому уперше:

- визначено шляхи та запропоновано удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості повномасштабних конструкцій несучих стін на основі випробування їхніх фрагментів за стандартним температурним режимом пожежі без прикладення навантаження, що дало змогу визначити розміри фрагментів та способи встановлення їх у камеру печі залежно від габаритів установки;

- науково обґрунтовано мінімально можливі параметри конфігурації камери вогневої печі та можливі відхилення її розмірів, що не впливають на забезпечення відтворюваності результатів експериментальних досліджень з нагрівання несучих стін;

- обґрунтовано можливість мінімізації кількості місць контролю температури при точкових замірах по перерізу залізобетонної стіни та їх раціонального розташування (на необігрівній поверхні, арматурі та в середині перерізу досліджуваного фрагменту), що дозволило зменшити кількість

засобів вимірювальних приладів в експериментальних дослідженнях із нагрівання стін на 30 % за рахунок підвищення відтворюваності результатів експериментів.

Удосконалено:

- експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін з метою підвищення екологічності та економічності виконання досліджень, а також врахуванню реальних розмірів конструкцій несучих стін;

- алгоритм відновлення температурних полів у несучих залізобетонних стінах за допомогою інтерполяції даних точкових замірів температури, отриманих під час нагрівання фрагментів конструкцій у малогабаритній вогневій установці, що уможливорює використання більш ефективної схеми розташування термопар під час експериментальних досліджень.

Набуло подальшого розвитку застосування експериментальних та обчислювальних методик для визначення реальних розподілів температури та міцності матеріалів несучих стін під час оцінювання їхньої межі вогнестійкості за рахунок використання малогабаритних вогневих установок для вирішення теплової задачі та розроблення розрахункових методик вирішення задачі міцності на основі отриманих результатів експериментів.

Практичне значення полягає у створенні та обґрунтуванні конфігурацій малогабаритних вогневих установок для дослідження теплового впливу пожежі на несучі стіни без механічного навантаження та врахуванні його під час виконання розрахунку міцності. Удосконалено метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін шляхом розробки засобів та розрахункових методик, що дозволяє на 30% зменшити кількість датчиків контролю температури та знижує втручання в цілісність досліджуваного зразка.

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовані у нових технічних рішеннях:

- компактна вогнева установка для проведення випробувань на визначення вогнестійкості відносно рівномірності прогріву малогабаритних будівельних конструкцій (Патент на корисну модель № 151322 від 06.07.2022);

- спосіб інтерполяції температурних розподілень несучих залізобетонних конструкцій на основі вимірювань температури у контрольних точках (Патент на корисну модель № 152662 від 29.03.2023).

Розроблено та науково-обґрунтовано удосконалений експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін, що дозволяє доповнити нормативно правову базу з урахуванням запропонованих нововведень, які дозволяють підвищити точність визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін за рахунок виконання експериментального випробування з нагрівання несучих залізобетонних стін у малогабаритній вогневій установці без дії механічного навантаження та врахуванні його в процесі розрахунку на міцність, відповідно зменшити вартість виконання випробувань і обсяг робіт.

Результати дослідження впроваджено в:

- діяльність *ТОВ «ТЕСТ»*, що дозволяє підвищити ефективність процесу оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних стін за рахунок врахування особливостей застосованих матеріалів досліджуваного фрагменту під час виконання експериментів та механічного навантаження у процесі розрахунку та використання розробленої методики оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних стін за допомогою удосконаленого експериментально-розрахункового методу (акт упровадження від 14.06.2023);

- у випробувальну діяльність науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, що дозволяє доповнити нормативно правову базу з урахуванням запропонованих нововведень, які значно підвищують точність оцінювання

межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін за рахунок проведення експериментальних випробувань з нагрівання несучих залізобетонних стін у малогабаритній вогневій установці без дії механічного навантаження та врахуванні його при проведенні розрахунку на міцність, що відповідно зменшить вартість проведення випробувань і обсяг робіт (акт упровадження від 10.07.2023);

- ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, в освітній процес, що підтверджує високий науково-методичний рівень викладання дисциплін, актуальний характер освіти та підвищує якість занять для здобувачів вищої освіти (акт упровадження від 29.08.2023).

Методи дослідження. В процесі огляду актуальних наукових досліджень у цій галузі застосовували аналітичний метод. Під час моделювання тепломасообміну у вогневих печах для випробування несучих стін на вогнестійкість застосовані математичні методи, засновані на основі систем диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, рівнянь теплопровідності, в умовах нагрівання під час пожежі рівнянь напружено-деформованого стану залізобетону та рівняння теплопровідності Фур'є. Для дослідження температурних даних та теплофізичних параметрів несучої залізобетонної стіни виконано експериментальні випробування за допомогою спеціально створеної в інституті малогабаритної вогневої установки, результати яких інтерпретовані стандартизованими математичними методами. Щоб перевірити достовірність та адекватність отриманих температурних даних вогневих випробувань несучих залізобетонних стін без прикладення механічного навантаження за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі застосовані методи математичної статистики.

У вступі описана загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дисертаційного дослідження, вказано наукову

новизну та практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі було проаналізовано актуальні наукові публікації та вимоги нормативних документів для оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін, досліджено метод натурних, вогневих випробувань, розрахункових та експериментально-розрахункових, сформульовано мету та завдання дисертації.

Завдяки виконаному аналізу виявлено, що для гарантування пожежної безпеки одним з найважливіших аспектів є застосування огорожувальних конструкцій з гарантованою межею вогнестійкості. Для забезпечення вогнестійкості несучих залізобетонних стін відповідно до вимог чинних будівельних норм України, важливим є питання обрання та застосування методів, які дають можливість прогнозувати та оцінювати вогнестійкість конструкцій для будівель, що в проєкті, а також які вже збудовані.

Встановлено особливості виконання дослідження кожного з методу, зазначено їхні переваги та недоліки. Слід зазначити, що експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості фрагментів несучих залізобетонних стін вивчений недостатньо.

Результати виконаного аналізу літературних джерел та патентного огляду дали можливість сформулювати мету й завдання для її досягнення.

У другому розділі сформовано дані про конфігурації, які можливо використовувати для математичного обчислення процесу тепломасообміну у камерах вогневих установок з метою визначення розподілу температур у внутрішніх шарах фрагменту, що досліджуємо, в будь-який момент часу розвитку чи згасання пожежі.

Описано особливості теоретичної бази, що застосовують у програмних продуктах обчислювальної газогідродинаміки.

Визначено 2 найбільш прийнятні комп'ютерні моделі FDS та FlowVision для моделювання тепломасообміну у камері вогневих печей.

Відповідно до виконаних моделювань визначено основні мінімально можливі геометричні параметри камери вогневої печі, отворів для виходу продуктів горіння, для пальників, місця розташування датчиків контролю температури та їхню мінімальну кількість.

Проаналізовано характеристики матеріалів, з яких можливо виготовляти малогабаритні установки.

В процесі досліджень засобами 2-ох програмних комплексів FDS та FlowVision визначено, що найменш можливі розміри внутрішнього простору камери печі від 1 м^3 до 2 м^3 дають можливість використовувати 2 пальники, відстань до яких має бути від 0,8 до 1 м, а також може забезпечувати універсальність для дослідження теплового впливу пожежі на основні типи залізобетонних будівельних конструкцій.

Було створено передумови для розроблення удосконаленої методики виконання експериментальних досліджень з нагрівання фрагментів несучих залізобетонних стін за допомогою малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції на базі навчального комплексу практичної підготовки фахівців оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.

У третьому розділі удосконалено методику з нагрівання фрагментів несучих залізобетонних стін за стандартним температурним режимом пожежі без прикладення навантаження.

Описано експериментальне обладнання та процес створення малогабаритної вогневої установки.

Описано методику виготовлення та формування фрагментів несучих залізобетонних стін, з обґрунтуванням їхньої кількості, що забезпечує відтворюваність випробувань.

Описано методику виконання експериментальних досліджень з нагрівання фрагментів несучих залізобетонних стін та отримання необхідного результату для виконання подальших розрахунків міцності.

Перевірено адекватність експериментальних даних на підставі отриманих результатів внаслідок експериментів з нагрівання малогабаритних фрагментів несучих залізобетонних стін: відносне відхилення не перевищило 3%, а розраховані критерії адекватності (F-критерій Фішера) нижче за критичне значення, що свідчить про високу відтворюваність результатів експериментів.

У четвертому розділі розроблено методику встановлення температурних розподілів шляхом інтерполяції використовуючи загальну схему апроксимації, де враховано:

1. температуру певної точки перерізу стіни у визначений момент часу, температуру першої та останньої точок у зазначений момент часу;
 2. кількість інтервалів між контрольними точками;
 3. показник ступеня параболи у визначений момент часу.
- Продемонстровано результати інтерполяції температур на 15, 30, 45, 60 хвилині дії стандартного температурного режиму пожежі.

Описано методику відновлення температурних розподілів у перерізі стінових елементів за точковими замірами на основні кваліфікаційного рівняння теплопровідності використовуючи граничні умови III роду. Кінцево-різницева апроксимація рівняння виконано із застосуванням інтегро-інтерполяційного методу.

Встановлено, що межа вогнестійкості стіни висотою 4 м з розподіленим навантаженням 300 т за 60 хв, по втраті несучої здатності не настає, а ресурс несучої здатності становить 31 %, а також те, що після 1 години випробувань міцність стіни майже не знижується за рахунок того, що обігрів стіни односторонній і арматура, яка знаходиться з необігрітого боку, продовжує виконувати свої функції за умови цілісності захисного

шару бетону, а також тим, що стіна має достатню протяжність, тому її міцність у декілька разів вище.

Виконано порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості стіни довжиною 3 м з розподіленим навантаженням 300 т та встановлено, що за час випробування зразка в 150 хв настання граничних станів за ознаками втрати несучої здатності (R), цілісності (E) та теплоізолювальної здатності (I) не відбулося.

У п'ятому розділі розроблено, описано та обґрунтовано удосконалений експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін, який дозволяє більш ефективно, в порівнянні з іншими, встановлювати межу вогнестійкості несучих залізобетонних стін за рахунок врахування як особливостей матеріалів конструкції, так і прикладених до неї в процесі експлуатації механічних навантажень.

Обґрунтовано, розроблено та пояснено удосконалену схему виконання експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін, яка має 6 основних блоків, для застосування яких використано 13 додаткових. Схема передбачає виготовлення фрагмента визначених розмірів з матеріалів, з яких зазвичай виготовляють повномасштабні конструкції, нагрівання у спеціальній малогабаритній установці та подальшого розрахунку міцності.

Розглянуто, яким чином можливо забезпечити розміри досліджуваного фрагмента відповідно до конструкції малогабаритної вогневої установки, що мають перевищувати на 20 мм з кожної сторони у зв'язку з тим, що це необхідно для забезпечення щільності прилягання досліджуваного фрагмента до камери печі.

Визначено основні необхідні дані отримані експериментальним шляхом, які є вхідними даними для виконання розрахунку міцності несучих залізобетонних стін такі, як: температура (на обігрівній, необігрівній поверхнях, арматурі, посередині перерізу стіни), висота,

товщина, товщина захисного шару досліджуваного фрагменту, клас міцності бетону та арматури, тип крупного заповнювача бетону, діаметри арматури, кількість та розташування стержнів.

Встановлено, що для здійснення перевіряння адекватності рекомендують використання відносного відхилення F-критерію Фішера, для цього необхідно виконати три ідентичних випробування, що підтвердить достовірність та стабільність отриманих результатів.

Завдяки виконаним дослідженням було обґрунтовано та запропоновано удосконалений експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін. Шляхом математичного моделювання, створення універсальної малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу на основні типи будівельних конструкцій, отримання експериментальних даних для виконання подальшого розрахунку міцнісних характеристик та визначення її реальних несучих здатностей.

Ключові слова: несуча залізобетонна стіна, пожежна безпека, поширення вогню, вогнестійкість, математична модель, термодинамічні розрахунки, експериментально-розрахунковий метод, вогнева установка, тепловий потік, комп'ютерне моделювання пожежі, процеси горіння.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. **Перегін А. В.,** Нуянзін О. М., Кришталь М. А., Заїка П. І. Комп'ютерне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2020. № 4(1). С. 71-79. DOI: [https:// doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.1.- 71 – 79](https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.1.-71-79).

2. **Перегін А. В.**, Нуянзін О.М. Етапи створення прототипу вогневої установки для визначення температурних розподілів малогабаритних фрагментів залізобетонних конструкцій. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2021. № 5(2). С. 75-82. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-75-82>.

3. **Перегін А. В.** Дослідження впливу конфігурації та параметрів вогневих печей на умови нагрівання несучих стін за стандартним температурним режимом пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2022. № 6 (1). С. 85-94. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.85-94>.

4. **Перегін А. В.** Удосконалення методики розрахункової оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі результатів вогневих експериментів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2023, № 7 (1). С. 89-97. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.89.98>.

Публікації у наукових виданнях, що входять до бази даних Scopus:

1. 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. Т. 708. №. 1. С. 012063. Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012063/pdf>.

2. **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. Режим доступу: <https://www.scientific.net/MSF.1066.206>.

3. **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. Режим доступу: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2684/1/030032/2893614/Improvement-of-means-for-assessing-fire-resistance?redirectedFrom=fulltext>.

Патенти на корисну модель:

1. **Перегін А. В.**, Нуянзін О. М., Гвоздь В. М., Тищенко О. М., Некора О. В., Землянський О. М. Компактна вогнева установка для проведення випробувань на визначення вогнестійкості відносно рівномірності прогріву малогабаритних будівельних конструкцій. *Патент України на корисну модель № 151322*, опубліковано 06.07.2022 року, бюлетень № 27.

2. **Перегін А. В.**, Нуянзін О. М., Гвоздь В. М., Тищенко О. М., Некора О. В., Кришталь М. А. Спосіб інтерполяції температурних розподілень у несучих залізобетонних конструкціях на основі вимірювань температури у контрольних точках. *Патент України на корисну модель № 152662*, опубліковано 29.03.2023 року, бюлетень № 13.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

1. **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. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-78-1-37-43.

Статті у наукових виданнях України, що додатково висвітлюють дисертаційні дослідження:

1. **Perehin A.**, Nuianzin O., Kryshthal D., Kryshthal 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.

Матеріали науково-практичних конференцій, що засвідчують апробацію дисертації:

1. Нуянзін О. М., Тищенко О. М., Жартовський С. В., Заїка П. І., **Перегін А. В.** Дослідження несучої здатності залізобетонних стін при

нерівномірному прогріві. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: матеріали 8-ої Міжнародної наук.-техн.конф.*, Харків, 2019. С. 92-93.

2. **Перегін А. В.**, Нуянзін О. М. Аналіз результатів моделювання тепломасообміну у камерах вогневих печей. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукр. наук.- практ. конф.*, Черкаси, 2020. С. 198–199.

3. Приступа Я., **Перегін А.** Аналіз стану нормативної бази із визначення вогнестійкості вертикальних несучих будівельних конструкцій. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів*, Черкаси, 2020. С.43-45.

4. **Перегін А.**, Нуянзін О., Самченко Т., Розробка комп'ютерної моделі вогневої печі у програмному комплексі FDS. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*, Черкаси, 2020. С. 189-191.

5. **Перегін А.**, Нуянзін О. Моделювання комп'ютерної моделі вогневої печі за допомогою системи автоматизованого проектування. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції* – Черкаси, 2021. С. 211–212.

6. Нуянзін О. М., **Перегін А. В.**, Шналь Т. М., Щіпець С. Д., Мирошник О. М. Експериментальне дослідження розподілів та міцнісних характеристик малогабаритного фрагменту. *Збірник тез доповідей 9-ої Міжнародної науково-технічної конференції: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті.* – Харків, 2021. С. 89-90.

7. **Перегін А.**, Кришталь Д., Нуянзін О. Аналіз температурних розподілів у камері вогневої печі при випробуванні залізобетонної плити на вогнестійкість. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XI*

Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси, 2021. С. 177–178.

8. Діденко Т., **Перегін А.**, Нуянзін О. Малогабаритна вогнева установка для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Черкаси, 2022. С. 91-92.

9. **Перегін А.**, Нуянзін О., Діденко Т. Верифікація даних отриманих під час експериментів з нагрівання малогабаритних елементів залізобетонних стін. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції*, Черкаси, 2022. С. 169-170.

10. Нуянзін О., **Перегін А.**, Борисова А., Нуянзін В. Результати експериментальних досліджень елементів залізобетонної стіни за стандартним температурним режимом пожежі. *Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції.* Харків, 2022. С. 40-41.

11. Радова І.С., **Перегін А.** Метод проведення випробувань на визначення вогнестійкості фрагментів будівельних конструкцій. *«Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених*, Харків, 2022. С. 79.

12. **Перегін А.**, Діденко Т. Засоби комп'ютерного моделювання процесу горіння у прототипі компактної вогневої установки. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів*, Черкаси, 2022. С.125-126.

13. I. Radova, **A. Perehin** The method of determining fire resistance limits by the improved method of testing beams. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Збірник наукових праць*

XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів, Львів, 2023. С. 236-238.

14. **Перегін А.**, Діденко Т., Ведула С. Методика відновлення температурних полів за результатами вогневих випробувань залізобетонної стіни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції, Черкаси, 2023. С. 192-194.*

15. **Перегін А.** Алгоритм відновлення температурних полів на основі отриманих даних експериментального дослідження. *«Наукові досягнення та відкриття сучасної молоді»: Матеріали II Всеукраїнська наукова конференція студентів та молодих вчених, Луцьк, 2023. С. 195-197.*

16. **Перегін А.**, Голик Д. Дослідження тепломасообміну в камерах вогневих печей з різними геометричними параметрами. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів, Черкаси, 2023. С.128-130.*

ABSTRACT

Perehin A. V. Improvement of the experimental and calculation method of estimating the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 261 – Fire Safety. – Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, 2023.

Relevance of the topic.

To ensure the stability of buildings and structures during a fire, it is necessary to ensure that their fire resistance limit was not lower than the normative one. This will provide the necessary time for the evacuation of people and the work of operational units. Therefore, the accuracy of the established

limit of fire resistance of load-bearing reinforced concrete walls is one of the most important factors, since the entire structure is supported on them, among other.

One of the most common methods of evaluating the fire resistance limit for reinforced concrete load-bearing walls is the experimental method, namely the furnace test. Its feature is that large-sized furnaces give fairly reliable results. But at the same time, one should not forget the scale of our country: if an element of a building structure is manufactured, for example, in Odessa, then transportation for the purpose of evaluation is, at least, irrational. In such cases, it is possible to apply calculation methods, but they are limited by the general characteristics of the material and do not take into account the characteristics of many composite components, not to mention water and coarse aggregate, in the region where this element was manufactured, as well as different binders can be used and therefore, as a result of differences in the limit of fire resistance of such structures can differ by 10 minutes. Therefore, the method of assessing the fire resistance limit of reinforced concrete load-bearing walls must take into account all the details in view of the above-mentioned circumstances.

Analysis of scientific works performed in the field of fire resistance assessment of reinforced concrete building structures by such researchers: P. H. Krukovskyi, O. M. Nuianzin, S. L. Fomin, S. V. Novak, O. V. Nekora, S. V. Pozdieiev, T. Lie, B. Bartelemei, G. Kruppa, T. Harmathy, S. O. Sidnei, showed that there are widely considered methods of determining the actual limits of fire resistance of reinforced concrete building structures by experimental and calculation methods, but each of them has both advantages and disadvantages. And it was also found out that the method of evaluating the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls by experimental and calculation method using a small-sized fire installation to study the thermal effect of fire on building structures has not been investigated. This is a restraining factor for the use of reinforced concrete load-bearing walls, which have been tested only in experimental furnaces or only by the calculation

method, and is the reason for the discrepancy in the actual fire resistance limit of building structures.

Improving the method of assessing the fire resistance limit of reinforced concrete load-bearing walls using small-sized fire furnaces under the standard fire temperature regime without mechanical load and the subsequent calculation of strength characteristics taking it into account is an urgent scientific task, the solution of which will be the scientific basis for improving the effectiveness of the experimental and calculation method of assessing the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls.

The idea of the work is to improve the experimental and calculation method of assessing the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls to guarantee the normative time of their resistance in case of fire based on fire tests of their small-sized fragments without load, by taking into account the features of one-sided heating of the walls and substantiating the rational placement of points for temperature measurements inside the fragments, as well as taking into account the real dimensions of the structure at the calculation stage.

The object of the work is the processes of heating and deformation of load-bearing reinforced concrete walls during the action of the fire temperature regime.

The subject of the study is the assessment of the fire resistance limit of reinforced concrete load-bearing walls using the experimental and calculation method.

The purpose of the work is to increase the effectiveness of the method that combines the experimental and computational approach to assessing the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls by creating an improved algorithm, developing test tools, and substantiating the computational mathematical apparatus for interpreting the results on real objects.

To achieve the set goals, the following tasks were formed:

1. To analyze current scientific works and normative documents regarding the requirements for assessing the fire resistance limit of load-bearing

reinforced concrete walls. To determine ways to improve the experimental and calculation method.

2. To substantiate scientifically and create computer models for describing the process of heat and mass transfer in a small-sized fire test furnace. To determine ways to improve the design and configuration of the installation.

3. To carry out experimental studies of the thermal effect of a fire on a reinforced concrete wall using an improved small-sized fire installation. To check the adequacy of the obtained results.

4. To justify the algorithm and perform the calculation of the stress-strain state of the reinforced concrete wall based on the results of the obtained experimental studies.

5. To develop an improved experimental and calculation methodology for estimating the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls based on testing their fragments in small-sized fire furnaces and subsequent calculation.

The scientific novelty of the dissertation consists in solving the actual scientific and technical task of increasing the effectiveness of the process of assessing the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls through scientific substantiation and the further development of improvements for the experimental and calculation method of its determination, taking into account the characteristics of the materials used during experiments and mechanical load during the calculation process.

The following main scientific results were obtained:

At the same time, for the first time:

- the ways for improvement of the experimental and calculation method of evaluating the fire resistance of full-scale structures of load-bearing walls based on the test of their fragments under the standard fire temperature regime without applying a load are proposed, which made it possible to determine the dimensions of

the samples and the methods of installing them in the furnace chamber depending on the dimensions of the installation;

- the minimum possible configuration parameters of the furnace chamber and possible deviations in its dimensions, which do not affect the reproducibility of the results of experimental studies on the heating of load-bearing walls are scientifically substantiated;

- the possibility of minimizing the number of temperature control points during point measurements along the cross-section of a reinforced concrete wall and their rational location (on the non-heating side, armature and the middle of the cross-section of the studied fragment) is substantiated, which made it possible to reduce the number of measuring equipment in experimental studies on wall heating by 30% due to increasing the reproducibility of experimental data.

It has been improved:

- an experimental-calculation method for assessing the fire resistance of load-bearing reinforced concrete walls, thanks to the increase in environmental friendliness and economy of research, as well as taking into account the real dimensions of load-bearing wall structures;

- computational interpolation algorithms for restoring temperature fields in load-bearing reinforced concrete walls based on temperature indicators in specified places, in the middle of structures during fire tests, are substantiated, which makes it possible to propose a more effective scheme for the location of thermocouples in cross-sections of fragments of load-bearing reinforced concrete walls.

The application of experimental and computational methods for determining the real temperature distributions and strength of load-bearing wall materials during the assessment of their fire resistance limit *has been further developed*.

The practical value is in providing justified parameters for creating configurations of small-sized fire installations for the study of the thermal effect of fire on vertical load-bearing building structures without the effect of mechanical load and taking them into account when performing strength

calculations. The method of assessing the fire resistance limit of a reinforced concrete wall using the experimental and calculation method has been improved. The scientifically based method allows to reduce the number of temperature control sensors by 30%, due to which the intervention in the integrity is reduced, by determining the locations of thermocouples and their more rational arrangement.

- The results of the performed theoretical and experimental studies are implemented in new technical solutions:

- compact fire installation for conducting tests to determine fire resistance relative to the uniformity of heating of small-sized building structures No. 151322 dated 07/06/2022;

- method of interpolation of temperature distributions of load-bearing reinforced concrete structures based on temperature measurements at control points No. 152662 dated 03/29/2023.

An improved experimental and calculation method for assessing the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls has been developed and proposed, which makes it possible to supplement the regulatory legal framework taking into account the proposed innovations, which allow to significantly increase the accuracy of determining the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls by performing an experimental test on heating load-bearing reinforced concrete walls in a small-sized fire installation without the effect of mechanical load and taking it into account in the process of calculating strength, accordingly reduce the cost of performing tests and the scope of work.

- The results of the study are implemented in:

- the activity of "TEST" LLC, which allows to increase the effectiveness of the process of assessing the fire resistance of load-bearing reinforced concrete walls by taking into account the features of the applied materials of the studied fragment during experiments and the mechanical load during the calculation process and using the developed method of assessing the fire resistance of load-bearing reinforced

concrete walls with the help of an improved experimental and calculation method (implementation act dated 06/14/2023);

- in the testing activities of the scientific and testing center of the Institute of State Administration and Scientific Research on Civil Defense, which allows to supplement the normative and legal framework taking into account the proposed innovations, which will significantly increase the accuracy of assessing the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls by conducting experimental tests on heating load-bearing reinforced concrete walls in a small-sized fire installation without the effect of mechanical load and taking it into account when calculating strength, which will accordingly reduce the cost of conducting tests and the scope of work (implementation act dated 07.10.2023);

- ChIFS named after Chernobyl Heroes of NUCP of Ukraine, in the educational process, which confirms the high scientific-methodical level of teaching disciplines, the current nature of education and increases the quality of classes for students of higher education (implementation act dated 08.29.2023).

Research methods. An analytical method was used during the review of current scientific research in this field. In the process of modeling the heat and mass transfer in fire furnaces during the test of load-bearing walls for fire resistance, mathematical methods are applied, which are based on systems of differential equations of continuous environments such as the Navier-Stokes equations, equations of thermal conductivity and the stress-strain state of reinforced concrete under conditions of heating during a fire and the Fourier equation of heat conduction. To study the temperature data and thermophysical parameters of the load-bearing reinforced concrete wall, experimental tests were performed with the help of a small-sized fire installation specially created at the institute, the results of which were interpreted by standardized mathematical methods. In order to check the reliability and adequacy of the obtained temperature data of fire tests of load-bearing reinforced concrete walls without applying a mechanical load under the conditions of exposure to the standard fire temperature regime, the methods of mathematical statistics were applied.

The introduction describes the general characteristics of the work, substantiates the relevance of the topic of the dissertation research, reveals the connection of the work with scientific programs, plans and topics, formulates the goal, task, object and subject of the dissertation research, indicates the scientific novelty and practical significance of the obtained results, defines the personal the acquirer's contribution. Data on approval, publications, structure and scope of work are given.

In the first chapter current scientific publications and requirements of normative documents for evaluating the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls were analyzed, the peculiarities of the method of field tests, fire tests, calculation and experimental-calculation methods were investigated, the goal and objectives of the dissertation research were formulated.

Thanks to the performed analysis, it was found that one of the most important aspects for guaranteeing fire safety is the use of enclosing structures with a guaranteed fire resistance limit. In order to ensure the fire resistance of load-bearing reinforced concrete walls in accordance with the requirements of the current construction standards of Ukraine, it is important to choose and use methods that make it possible to predict and evaluate the fire resistance of structures for buildings, both in the project and already built.

The specifics of the research of each method are established, their advantages and disadvantages are indicated. It should be noted that the experimental and calculation method of estimating the fire resistance limit of fragments of load-bearing reinforced concrete walls has not been sufficiently studied.

The results of the performed analysis of literary sources and patent review made it possible to formulate the goal and tasks for its achievement.

In the second section, data on models that can be used for mathematical calculation of the process of heat and mass transfer in the chambers of fire furnaces are formed in order to determine the temperature distribution in the

internal layers of the fragment under investigation at any time during the development or extinction of the fire.

Features of the theoretical base used in computational gas-hydrodynamics software products are described.

Two most suitable computer models FDS and FlowVision for modeling heat and mass transfer in the chamber of fire furnaces have been determined.

According to the performed simulations, the main minimum possible geometric parameters of the fire furnace chamber, openings for the exit of combustion products, for burners, locations of temperature control sensors and their minimum number were determined.

The characteristics of the materials from which it is possible to manufacture small-sized furnaces were analyzed, in particular the use of fireclay bricks, which have a fire resistance index of +1,690° C and are suitable for the construction of a fire furnace chamber.

In the process of research using 2 software complexes FDS and FlowVision, it was determined that the smallest possible dimensions of the inner space of the furnace chamber are from 1 m³ to 2 m³ make it possible to use 2 burners, the distance to which should be from 0.8 to 1 m, and can also provide versatility for studying the thermal effect of fire on all main types of reinforced concrete building structures.

Prerequisites were created for the development of an improved methodology for conducting experimental studies on heating fragments of load-bearing reinforced concrete walls with the help of a small-sized fire furnace for the study of the thermal effect of fire on building structures on the basis of the educational complex for the practical training of specialists of the Operational and Rescue Service of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine.

In the third section, an improved technique for heating fragments of load-bearing reinforced concrete walls according to the standard fire temperature regime without applying a load is developed.

Experimental equipment and the process of creating a small-sized fire installation are described.

The method of manufacturing and forming samples-fragments of load-bearing reinforced concrete walls is described, with justification of their quantity, which ensures the reliability of the tests.

The method of conducting experimental studies on heating samples-fragments of load-bearing reinforced concrete walls and obtaining the necessary result for further calculations is described.

The adequacy of the experimental data was checked on the basis of the information obtained as a result of experiments on heating small fragments of load-bearing reinforced concrete walls: the relative deviation did not exceed 3%, and the calculated adequacy criteria (Fisher's F-criterion) were below the critical value.

In the fourth chapter a method of establishing temperature distributions by interpolation using a general block diagram of approximation is developed, where the temperature of a certain point of the wall section at a specified time, the temperature of the first and last points at the specified time are taken into account; the number of intervals between control points; indicator of the degree of the parabola at a certain moment in time. The results of temperature interpolation for 15, 30, 45, 60 minutes of the standard fire temperature regime are demonstrated.

The method of restoration of temperature distributions in the cross-section of wall elements based on point measurements on the basic qualitative equation of heat conduction using boundary conditions of the 3rd kind is described. The finite-difference approximation of the equation was performed using the integro-interpolation method.

It was established that the limit of fire resistance of a wall 4 m high with a distributed load of 300 t in 60 min is not reached, and the resource of the load-bearing capacity is 31%, and also that after 1 hour of testing, the strength of the wall is almost not reduced due to the fact that the heating of the wall is one-

sided and the armature, which is on the unheated side, continues to perform its functions under the condition of the integrity of the protective layer of concrete, as well as the fact that the wall has sufficient length, unlike the column, so its strength is several times higher.

A comparative analysis of the assessment of the fire resistance limit of a 3 m long wall with a distributed load of 300 t was performed and it was established that during the test of the sample in 150 minutes, the onset of limit states in terms of loss of load-bearing capacity (R), integrity (E) and thermal insulation capacity (I) did not occur.

In the fifth chapter an improved experimental and calculation methodology for assessing the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls is developed, described and substantiated. The proposed method allows more effectively, compared to others, to set the limit of fire resistance of load-bearing reinforced concrete walls by taking into account both the features of the construction materials and the mechanical loads applied to it during operation.

An improved scheme for the implementation of the experimental-calculation method of assessing the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls is justified, developed and explained, which has 6 main blocks, for the application of which 13 additional blocks are used. The scheme provides for the manufacture of a sample of specified dimensions from the materials from which full-scale structures are usually made, heating in a special small-sized installation and subsequent calculation of strength.

It is considered how it is possible to ensure the dimensions of the examined fragment in accordance with the design of a small-sized fire installation, which should exceed 20 mm on each side due to the fact that this is necessary to ensure the closeness of the examined fragment to the furnace chamber.

The main necessary data obtained experimentally were determined, such as the temperature on the heating and non-heating surfaces, reinforcement and in

the middle of the wall section, height, thickness, thickness of the protective layer of the structure under study, strength class of concrete and reinforcement, type of coarse concrete aggregate, diameters of reinforcement, the number and location of rods, which are input data for calculating the strength of load-bearing reinforced concrete walls.

It was established that the use of relative deviation of Fisher's F-criterion is recommended for adequacy testing, for this it is necessary to perform 3 identical tests, which will confirm the reliability and stability of the obtained results.

Thanks to the conducted research, an experimental and computational method of estimating the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls was substantiated and proposed. By means of mathematical modeling, the creation of a universal small-sized fire installation for the study of thermal effects on the main types of building structures, obtaining experimental data for the further calculation of strength characteristics and the determination of its real bearing capacity.

Key words: load-bearing reinforced concrete wall, fire safety, fire propagation, fire resistance, mathematical model, thermodynamic calculations, experimental and calculation method, fire installation, heat flow, computer simulation of fire, combustion processes.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine:

1. **Perehin A. V.**, Nuianzin O. M., Kryshtal M. A., Zaika P. I. Computer modeling of the heat and mass transfer process in the chambers of fire furnaces of installations for testing the fire resistance of building structures. *Emergency situations: prevention and elimination*. Cherkasy, 2020. № 4(1). p. 71-79. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.1.-71-79>.

2. **Perehin A.V., Nuianzin O.M.** Stages of creating a prototype of a fire installation for determining temperature distributions of small-sized fragments of reinforced concrete structures. *Emergency situations: prevention and elimination*. Cherkasy, 2021. № 5(2). p. 75-82. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-75-82>.
3. **Perehin Alina.** Study of the influence of the configuration and parameters of the fire furnaces on the heating conditions of the load-bearing walls under the standard temperature regime. *Emergency situations: prevention and elimination*. Cherkasy, 2022. № 6 (1). p. 85-94. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.85-94>.
4. **Perehin A.V.** Improvement of the method of calculating the limit of fire resistance of a load-bearing reinforced concrete wall based on the results of fire experiments. *Emergency situations: prevention and elimination*. Cherkasy, 2023, № 7 (1). p. 89-97. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.89.98>.

Publications in scientific publications included in the Scopus database::

1. 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. Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012063/pdf>.
2. **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. Режим доступу: <https://www.scientific.net/MSF.1066.206>.
3. **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. Режим доступу: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2684/1/030032/2893614/Improvement-of-means-for-assessing-fire-resistance?redirectedFrom=fulltext>.

Patents for a utility model:

1. **Perehin A. V.**, Nuianzin O. M., Hvozdz V. M., Tyshchenko O. M., Nekora O. V., Zemlianskyi O. M. Compact fire installation for conducting tests to determine the fire resistance relative to the uniformity of heating of small-sized building structures. *Ukrainian patent for a utility model № 151322*, dated 06.07.2022, bulletin № 27.

2. **Perehin A. V.**, Nuianzin O. M., Hvozdz V. M., Tyshchenko O. M., Nekora O. V., Kryshchal M. A. The method of interpolation of temperature distributions in load-bearing reinforced concrete structures based on temperature measurements at control points. *Ukrainian patent for a utility model № 152662*, dated 29.03.2023 року, bulletin № 13.

Articles in scientific periodicals of other countries:

1. **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. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-78-1-37-43.

Articles in scientific publications of Ukraine that additionally highlight dissertation research:

1. **Perehin A.**, Nuianzin O., Kryshchal D., Kryshchal M. Analysis of the results of heating a small fragment of a reinforced concrete wall during experimental studies. *Civil security: Public administration and crisis management*, Kyiv, 2022. № 1. p. 19-36.

Materials of scientific and practical conferences certifying the approval of the dissertation:

1. Nuianzin O. M., Tyshchenko O. M., Zhartovskyi S. V., Zaika P. I., **Perehin A. V.** Study of the load-bearing capacity of reinforced concrete walls with uneven heating. *Problems of reliability and durability of engineering*

structures and buildings in railway transport: materialy 8-oi Mizhnarodnoi nauk.-tekhn.konf., Kharkiv, 2019. p. 92-93.

2. **Perehin A. V.**, Nuianzin O. M. Analysis of the results of simulation of heat and mass transfer in the chambers of fire furnaces. *Emergency situations: safety and security: materialy X Vseukr. nauk.- prakt. konf., Cherkasy, 2020. p. 198–199.*

3. Prystupa Ya., **Perehin A.** Analysis of the state of the regulatory framework for determining the fire resistance of vertical load-bearing building structures. *The science of civil protection as a way of formation of young scientists: Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii kursantiv i studentiv, Cherkasy, 2020. p.43-45.*

4. **Perehin A.**, Nuianzin O., Samchenko T., Development of a computer model of a fire furnace in the FDS software complex. *Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations: Materialy XI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Cherkasy, 2020. p. 189-191.*

5. **Perehin A.**, Nuianzin O. Simulation of a computer model of a fire furnace using an automated design system. *Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations: Materialy XII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Cherkasy, 2021. p. 211–212.*

6. Nuianzin O. M., **Perehin A. V.**, Shnal T. M., Shchipets S. D., Myroshnyk O. M. Experimental study of distributions and strength characteristics of a small fragment. *Zbirnyk tez dopovidei 9-oi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii: Problems of reliability and durability of engineering structures and buildings in railway transport. – Kharkiv, 2021. p. 89-90.*

7. **Perehin A.**, Kryshthal D., Nuianzin O. Analysis of temperature distributions in the fire furnace chamber during fire resistance testing of a reinforced concrete slab. *Emergency situations: safety and security: Materialy*

XI Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu. Cherkasy, 2021. p. 177–178.

8. Didenko T., **Perehin A.**, Nuianzin O. Small-sized fire installation for researching the thermal effect of fire on building structures. *Emergency situations: safety and security: Materialy XI Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu.* Cherkasy, 2022. p. 91-92.

9. **Perehin A.**, Nuianzin O., Didenko T. Verification of data obtained during experiments on heating small-sized elements of reinforced concrete walls. *Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations: Materialy XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii,* Cherkasy, 2022. p. 169-170

10. Nuianzin O., **Perehin A.**, Borysova A., Nuianzin V. Results of experimental studies of reinforced concrete wall elements under the standard fire temperature regime. *Problems of Emergency Situations: Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii.* Kharkiv, 2022. p. 40-41.

11. Radova I.S., **Perehin A.** The method of conducting tests to determine the fire resistance of fragments of building structures. *«Problems and prospects of providing civil protection»: Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh,* Kharkiv, 2022. p. 79.

12. **Perehin A.**, Didenko T. Means of computer modeling of the combustion process in a prototype of a compact fire installation. *The science of civil protection as a way of formation of young scientists: Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii kursantiv i studentiv,* Chekrasy, 2022. p.125-126.

13. I. Radova, **A. Perehin** The method of determining fire resistance limits by the improved method of testing beams. *Problems and prospects of the development of the life safety system: Zbirnyk naukovykh prats XVIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh, kursantiv ta studentiv,* Lviv, 2023. p. 236-238.

14. **Perehin A.**, Didenko T., Vedula S. The method of restoring temperature fields based on the results of fire tests of a reinforced concrete wall. *Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations: Materials of the 14th International Scientific and Practical Conference, Cherkasy*, 2023. p. 192-194.

15. **Perehin A.** Algorithm for restoration of temperature fields based on the obtained data of experimental research. «*Scientific achievements and discoveries of modern youth*»: *Materialy II Vseukrainska naukova konferentsiia studentiv ta molodykh vchenykh*, Lutsk, 2023. p. 195-197.

16. **Perehin A.**, Holyk D. Study of heat and mass transfer in the chambers of fire furnaces with different geometric parameters. *The science of civil protection as a way of formation of young scientists: Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii kursantiv i studentiv*, Cherkasy, 2023. p.128-130.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	39
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АКТУАЛЬНИХ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ТА ВИМОГ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТІН	52
1.1. Нормування вогнестійкості несучих стін	52
1.2. Аналіз методу натурних випробувань.....	55
1.3. Дослідження методу вогневих випробувань у печах несучих залізобетонних стін	60
1.4. Особливості розрахункових методів оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних стін	70
1.5. Аналіз експериментально-розрахункових методів оцінювання вогнестійкості несучих стін.....	79
1.6. Мета і завдання дисертації	81
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ МАЛОГАБАРИТНОЇ ВОГНЕВОЇ УСТАНОВКИ.....	83
2.1. Застосування математичних моделей на основі повної системи рівнянь Нав'є – Стокса для описування процесів, що відбуваються в камері вогневої печі	83
2.2. Аналіз основних характеристик програмних комплексів обчислювальної газогідродинаміки.....	88
2.3. Аналіз комп'ютерних моделей тепломасообміну у вогневих печах під час виконання випробування з нагрівання несучих залізобетонних стін.....	96
2.4. Розроблення моделі малогабаритної вогневої установки та перевірка валідності результатів за допомогою програмного комплексу FDS	100
2.5. Розроблення моделі малогабаритної вогневої установки та перевірка валідності результатів за допомогою програмного комплексу FlowVision	107

2.6. Розроблення концепту удосконаленої малогабаритної вогневої установки та описування її можливих параметрів	117
2.7. Висновки до розділу	127
РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З НАГРІВАННЯ ФРАГМЕНТІВ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТІН.....	130
3.1. Експериментальне обладнання та процес створення малогабаритної вогневої установки	130
3.2. Методика виготовлення та формування малогабаритних фрагментів несучих залізобетонних стін для випробування	139
3.3. Методика виконання експериментального дослідження з нагрівання фрагмента несучої залізобетонної стіни у малогабаритній вогневій установці	143
3.4. Процес виконання експериментального дослідження з нагрівання фрагментів несучих залізобетонних стін та його результати.....	146
3.5. Встановлення адекватності результатів виконання експериментального дослідження	152
3.6. Висновки до розділу	154
РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ЧАСТИНИ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ОЦІЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТІН.....	157
4.1. Методика відновлення температурних розподілень у перерізі стінових елементів за точковими замірами	157
4.2. Відновлення температурних полів за результатами експериментальних досліджень	164
4.3. Результати використання запропонованого методу	168

4.4. Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін	172
4.5. Висновки до розділу	174

РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТІН.....	177
---	-----

5.1. Загальний опис удосконаленої експериментально-розрахункової методики оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін...	177
5.2. Вимоги щодо малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на несучі залізобетонні стіни	178
5.3. Вимоги щодо створення фрагмента залізобетонної несучої стіни для виконання експериментальної частини удосконаленої методики оцінювання межі вогнестійкості	181
5.4. Алгоритм виконання експериментального дослідження з нагрівання несучої залізобетонної стіни за стандартним температурним режимом пожежі.....	183
5.5. Необхідний результат експериментального дослідження для оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін	185
5.6. Методика відновлення температурних полів.....	186
5.7. Розрахунок міцності бетону фрагмента несучої залізобетонної стіни на основі теплових значень за удосконаленою методикою.....	188
5.8. Аналіз точності результатів оцінювання межі вогнестійкості несучих стін за удосконаленим експериментально-розрахунковим методом	189
5.9. Схема проведення удосконаленого експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих стін	192
5.10. Висновки до розділу.....	195

ВИСНОВКИ	198
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	201
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	214
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації.....	220

ВСТУП

Актуальність теми. Для забезпечення стійкості будівель та споруд під час пожежі необхідно гарантувати, що їхня межа вогнестійкості була не нижчою за нормативну. Це забезпечить необхідний час для евакуації людей та роботи оперативних підрозділів. Тому точність встановленої межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін є одним з найважливіших факторів, так як вони є постійним пожежним навантаженням споруди.

Одним із найбільш поширених методів оцінювання межі вогнестійкості для залізобетонних несучих стін 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. В таких випадках можливо застосувати розрахункові методи, але вони обмежені загальними характеристиками матеріалу і не враховують особливостей багатокомпонентних складників, не кажучи вже про воду і крупний заповнювач, в тому регіоні де цей елемент виготовляли, 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.

Аналіз наукових робіт, виконаних у галузі оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, таких дослідників: П. Г. Круковського, С. В. Поздєєва, О. М. Нуянзіна, С. Л. Фоміна, О. В. Некори, С. В. Новака, С. О. Сіднея, В. Barteleml, G. Kruppa, T. Lie, T. Narmathu показав, що широко розглянуті методи визначення фактичних меж вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій експериментальним та розрахунковим шляхом, але кожен з них має як

недоліки так і переваги. А також було з'ясовано, що метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін експериментально-розрахунковим шляхом з використанням малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції, не був досліджений. Це є фактором стримування для застосування залізобетонних несучих стін, які були випробувані лише в експериментальних печах або тільки розрахунковим методом, та є причиною невідповідності фактичної межі вогнестійкості будівельних конструкцій.

Удосконалення методу оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних несучих стін з використанням малогабаритних вогневих печей за стандартним температурним режимом пожежі без механічного навантаження та подальшого розрахунку міцнісних характеристик з його урахуванням є актуальним науковим завданням, розв'язання якого буде науковим підґрунтям підвищення ефективності експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота підготовлена у межах виконання розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р «Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року» та відповідно до розділу 2 п. 17 «Плану наукової та науково-технічної діяльності ДСНС України на 2021 рік», розділу 2 «Плану наукової та науково-технічної діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля (ЧПБ) НУЦЗ (Національного університету цивільного захисту) України на 2021 рік». Дисертаційне дослідження є складником технічного завдання науково-дослідної роботи в ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій за результатами випробувань їх малогабаритних фрагментів» («Фрагменти – вогнестійкість»), державний реєстраційний номер НДР – 0121U109145, де здобувачка була виконавцем.

Ідея роботи полягає в удосконаленні експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін для гарантування нормативного часу їхньої стійкості в разі пожежі на основі вогневих випробувань їхніх малогабаритних фрагментів без навантаження, шляхом урахування особливостей одностороннього нагрівання стін та обґрунтування раціонального розміщення місць точкових замірів температури всередині фрагментів, а також урахування реальних габаритів на етапі розрахунку.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності методу, що об'єднує експериментальний та розрахунковий підхід до оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін шляхом створення удосконаленого алгоритму, розробки засобів випробувань та обґрунтування розрахункового математичного апарату інтерпретації результатів на реальні об'єкти.

Для досягнення поставлених цілей були сформовані такі завдання:

1. Проаналізувати актуальні наукові праці та нормативні документи щодо вимог з оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін. Визначити шляхи удосконалення експериментально-розрахункового методу.

2. Науково обґрунтувати та створити комп'ютерні моделі для описування процесу тепломасообміну у малогабаритній вогневій випробувальній установці. Визначити шляхи удосконалення конструкції та конфігурації установки.

3. Виконати експериментальні дослідження стандартного температурного режиму пожежі на залізобетонну стіну із застосуванням удосконаленої малогабаритної вогневої установки. Перевірити адекватність отриманих результатів.

4. Обґрунтувати алгоритм та виконати розрахунок напружено-деформованого стану залізобетонної стіни на основі результатів отриманих експериментальних досліджень.

5. Розробити удосконалений експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін на основі випробування їхніх досліджуваних фрагментів у малогабаритних вогневих установках та проведення подальшого розрахунку міцності.

Об'єкт роботи – процеси нагрівання та деформації несучих залізобетонних стін під час дії стандартного температурного режиму пожежі.

Предметом дослідження є оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін за допомогою експериментально-розрахункового методу.

Методи дослідження. В процесі огляду актуальних наукових досліджень у цій галузі застосовували аналітичний метод. Під час моделювання тепломасообміну у вогневих печах для випробування несучих стін на вогнестійкість застосовані математичні методи, засновані на основі систем диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, рівнянь теплопровідності, в умовах нагрівання під час пожежі рівнянь напружено-деформованого стану залізобетону та рівняння теплопровідності Фур'є. Для дослідження температурних даних та теплофізичних параметрів несучої залізобетонної стіни виконано експериментальні випробування за допомогою спеціально створеної в інституті малогабаритної вогневої установки, результати яких інтерпретовані стандартизованими математичними методами. Для перевіряння достовірності та адекватності отриманих температурних даних вогневих випробувань несучих залізобетонних стін, без прикладення механічного навантаження, застосовані методи математичної статистики за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Наукова новизна дисертації полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання щодо підвищення ефективності процесу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін шляхом наукового обґрунтування та подальшого удосконалення для

експериментально-розрахункового методу її визначення з урахуванням особливостей застосованих матеріалів під час експериментів та механічного навантаження у процесі розрахунку.

Отримані такі основні наукові результати:

При цьому уперше:

- визначено шляхи та запропоновано удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінювання вогнестійкості повномасштабних конструкцій несучих стін на основі випробування їхніх фрагментів за стандартним температурним режимом пожежі без прикладення навантаження, що дало змогу визначити розміри фрагментів та способи установа їх у камеру печі, в залежності від габаритів установки;

- науково-обґрунтовано мінімально можливі параметри конфігурації камери вогневої печі та можливі відхилення її розмірів, що не впливають на забезпечення відтворюваності результатів експериментальних досліджень з нагрівання несучих стін;

- обґрунтовано можливість мінімізації кількості місць контролю температури при точкових замірах по перерізу залізобетонної стіни та їх раціонального розташування (на необігрівній поверхні, арматурі та в середині перерізу досліджуваного фрагменту), що дозволило зменшити кількість засобів вимірювальних приладів в експериментальних дослідженнях із нагрівання стін на 30 % за рахунок підвищення відтворюваності результатів експериментів.

Удосконалено:

- експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін з метою підвищення екологічності та економічності виконання досліджень, а також врахуванню реальних розмірів конструкцій несучих стін;

- алгоритм відновлення температурних полів у несучих залізобетонних стінах за допомогою інтерполяції даних точкових замірів температури, отриманих під час нагрівання фрагментів конструкцій у малогабаритній

вогневій установці, що уможливило використання більш ефективної схеми розташування термопар під час експериментальних досліджень.

Набуло подальшого розвитку застосування експериментальних та обчислювальних методик для визначення реальних розподілів температури та міцності матеріалів несучих стін під час оцінювання їхньої межі вогнестійкості за рахунок використання малогабаритних вогневих установок для вирішення теплової задачі та розроблення розрахункових методик вирішення задачі міцності на основі отриманих результатів експериментів.

Обґрунтованість, достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджені результатами аналізу актуальних наукових публікацій та вимог нормативних документів з оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін; відповідністю розроблених методів дослідження поставленим меті і завданням; адекватністю та достовірністю отриманих результатів експериментальних досліджень; удосконаленням експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін відповідно до вимог чинних національних стандартів; апробацією та застосуванням на практиці впроваджених результатів досліджень.

Практичне значення полягає у створенні та обґрунтуванні конфігурацій малогабаритних вогневих установок для дослідження теплового впливу пожежі на несучі стіни без механічного навантаження та врахуванні його під час виконання розрахунку міцності. Удосконалено метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін шляхом розробки засобів та розрахункових методик, що дозволяє на 30% зменшити кількість датчиків контролю температури та знижує втручання в цілісність досліджуваного зразка.

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовані у нових технічних рішеннях:

- компактна вогнева установка для проведення випробувань на визначення вогнестійкості відносно рівномірності прогріву малогабаритних будівельних конструкцій (Патент на корисну модель № 151322 від 06.07.2022);

- спосіб інтерполяції температурних розподілень несучих залізобетонних конструкцій на основі вимірювань температури у контрольних точках (Патент на корисну модель № 152662 від 29.03.2023).

Розроблено та науково-обґрунтовано удосконалений експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін, що дозволяє доповнити нормативно правову базу з урахуванням запропонованих нововведень, які дозволяють підвищити точність визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін за рахунок виконання експериментального випробування з нагрівання несучих залізобетонних стін у малогабаритній вогневій установці без дії механічного навантаження та врахуванні його в процесі розрахунку на міцність, відповідно зменшити вартість виконання випробувань і обсяг робіт.

Результати дослідження впроваджено в:

- діяльність *ТОВ «ТЕСТ»*, що дозволяє підвищити ефективність процесу оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних стін за рахунок врахування особливостей застосованих матеріалів досліджуваного фрагменту під час виконання експериментів та механічного навантаження у процесі розрахунку та використання розробленої методики оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних стін за допомогою удосконаленого експериментально-розрахункового методу (акт упровадження від 14.06.2023);

- у випробувальну діяльність науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, що дозволяє доповнити нормативно правову базу з урахуванням запропонованих нововведень, які значно підвищують точність оцінювання

межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін за рахунок проведення експериментальних випробувань з нагрівання несучих залізобетонних стін у малогабаритній вогневій установці без дії механічного навантаження та врахуванні його при проведенні розрахунку на міцність, що відповідно зменшить вартість проведення випробувань і обсяг робіт (акт упровадження від 10.07.2023);

- Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, в освітній процес, що підтверджує високий науково-методичний рівень викладання дисциплін, актуальний характер освіти та підвищує якість занять для здобувачів вищої освіти (акт упровадження від 29.08.2023).

Особистий внесок здобувача полягає у виконанні аналізу актуальних наукових публікацій та вимог нормативних документів з оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін; в моделюванні математичних моделей, які у випробувальних вогневих печах описують процес тепломасообміну під час оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін; у визначенні параметрів регресійних залежностей об'єму камери печі, відстані від поверхні досліджуваного фрагменту несучої залізобетонної стіни до пальників та висоти, на якій знаходиться отвір для видалення продуктів горіння; в розробленні та виконанні експериментальних вогневих випробувань з нагрівання фрагментів несучих залізобетонних стін відповідно до стандартного температурного режиму пожежі; в інтерполяції температур на основі отриманих даних з нагрівання фрагменту несучої залізобетонної стіни та розрахунку задачі міцності фрагменту несучої залізобетонної стіни; в розробленні удосконаленого експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін. Також особистий внесок здобувачки висвітлений в наукових публікаціях, виконаних у співавторстві, які відповідають тематиці дисертації:

- В науковій праці «Комп'ютерне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій» здобувачка розробила комп'ютерну модель вогневої печі в програмному комплексі FDS та виконала аналіз результатів моделювання тепломасообміну для виявлення можливостей відтворення умов випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій [64].

- В науковій праці «Етапи створення прототипу вогневої установки для визначення температурних розподілів малогабаритних фрагментів залізобетонних конструкцій» здобувачка описала етапи створення прототипу малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу на будівельні конструкції. Перевірила розподіл температур по всій площі печі та проаналізувала отримані результати [90].

- В науковій праці «Дослідження впливу конфігурації та параметрів вогневих печей на умови нагрівання несучих стін за стандартним температурним режимом пожежі» здобувачка у програмному комплексі FlowVision розробила 3 математичні моделі конфігурації вогневих печей, з метою дослідження теплового впливу на несучі стіни – які відрізнялися геометричними параметрами конструкції камери печі, розмірами отворів для встановлення пальників та отвору для видалення продуктів горіння [70].

- В науковій праці «Удосконалення методики розрахункової оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі результатів вогневих експериментів» здобувачка розробила алгоритм проведення розрахунку оцінювання межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни, що лягає в основу загальної методики за результатами вогневих випробувань без дії механічного навантаження [111].

- В науковій праці «The research of carrying capacity of reinforced concrete walls under uneven warming» здобувачка здійснила аналіз попередніх праць, виділила позитивні та недопрацьовані моменти і прийняла участь у розробці алгоритму проведення обчислювального експерименту [57].

- В науковій праці «Results of Experimental Investigations of Reinforced Concrete Wall Elements According to the Standard Temperature Mode of Fire» здобувачка розробила методику, яка дає можливість отримати дані температурних розподілів на поверхні фрагмента стіни та в її перерізі. Описала спосіб виконання вогневого випробування щодо розрахункового оцінювання межі вогнестійкості малогабаритного фрагмента несучої стіни, перевірила відтворюваність експериментальних даних та розподілення температур по всій площі вогневої печі досліджуваного фрагмента та проаналізувала отримані результати [89].

- В науковій праці «Improvement of means for assessing fire resistance of fragments of reinforced concrete structures» здобувачка розкрила методику проведення експериментального дослідження з нагрівання несучої залізобетонної стіни у малогабаритній вогневій установці для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції [17].

- В науковій праці «Technique for creating the prototype of a compact fire plant for tests to determine the fire resistance of reinforced concrete structures» здобувачка описала етапи створення прототипу вогневої установки на базі Навчального комплексу практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України та виконала аналіз результатів перших запусків установки [91].

- В науковій праці «Аналіз результатів прогрівання малогабаритного фрагмента залізобетонної стіни під час експериментальних досліджень» здобувачка дослідила відомі методи виконання випробувань на оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій в умовах пожежі, визначила структуру бетону, на основі якої створила три малогабаритні фрагменти залізобетонної стіни, виконала дослідження з їхнього нагрівання та перевірила розподіл температур по середині перерізу досліджуваного фрагмента: на арматурі, на обігрівній та необігрівній поверхні [110].

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дослідження доповідали і обговорювали на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях, таких як:

- 8-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, УкрДУЗТ, 2019 р.);
- XI Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020 р.);
- Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів і студентів «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020 р.);
- X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020 р.);
- XII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021р.);
- 9-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, УкрДУЗТ, 2021р.);
- XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021 р.);
- XII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.);
- XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.)

- Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, НУЦЗ України, 2022 р.).
- Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, НУЦЗ України, 2022 р.)
- Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів і студентів «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.)
- XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, ЛДУ БЖД, 2023 р.)
- XIV Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкас, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023 р.)
- II Всеукраїнська наукова конференція студентів та молодих вчених «Наукові досягнення та відкриття сучасної молоді» (м. Луцьк, ДНТУ, 2023 р.)
- Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів і студентів «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених» (м. Черкаси ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023 р.)

Публікації. Результати досліджень, які висвітлено у дисертації, опубліковано в 27 наукових працях: 4 статті у наукових фахових періодичних виданнях України, 1 стаття у науковому виданні України, що додатково висвітлює дисертаційне дослідження, 1 стаття у міжнародному науковому виданні, 3 публікації, що індексуються в наукометричній базі Scopus, 2 патенти на корисну модель та 16 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Структура дисертації та її обсяг. Робота містить анотацію, зміст, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 224 сторінки, з них основного тексту 162

сторінки, 16 таблиць, 73 рисунки, список використаних джерел містить 111 найменувань та займає 12 сторінок, а також 2 додатка на 10 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АКТУАЛЬНИХ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ТА ВИМОГ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТІН

1.1. Нормування вогнестійкості несучих 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 прикладається, а також є огорожувальним елементом будівельних конструкцій, які виконують несучу функцію, сприймаючи водночас основне навантаження у будівлі [1-3].

Від вогнестійкості та тривалості теплового впливу пожежі на огорожувальні 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 відмінну 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 огорожувальних конструкцій з гарантованою межею вогнестійкості.

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 фрагмента 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 фрагмента, мм.

Граничний стан за ознакою втрати теплоізолювальної здатності [1, 2] є підвищення температури у приміщенні, суміжному приміщенню із пожежею, тобто на необігрівній поверхні перевищення середньої температури досліджуваного фрагмента над початковою середньою температурою цієї поверхні на 140 °С або перевищення температури необігрівній поверхні досліджуваного фрагмента 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 і огорожувальні функції у будівлях і несучі [4 – 5].

Відповідно до умовних класів будівель та споруд вимоги до вогнестійкості елементів будівельних конструкцій називають ступенями вогнестійкості. У табл. 1.1 наведені ступені вогнестійкості будинку та класи вогнестійкості будівельних конструкцій [6].

Таблиця 1.1 – Ступені вогнестійкості будинку та класи вогнестійкості будівельних конструкцій [6]

Ступінь вогнестійкості	Мінімальні значення класів вогнестійкості будівельних конструкцій і максимальні значення груп поширення вогню по них								
	Стіни				Колони	Сходові площадки, косоури, сходи, балки, марші сходових кліток	Пере-криття міжповерхові (у т.ч. горищні та над підвалами)	Елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні ненесучі	внутрішні ненесучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
I	REI 150 M0	REI 90 M0	E30 M0	EI 30 M0	R 150 M0	R60 M0	REI 60 M0	RE 30 M0	R30 M0
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R30 M0
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15, M0 E 30, M1	EI 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	
IIIa	REI 60 M0	REI 30 M0	E 15 M1	EI 15 M1	R 15 M0	R 60 M0	REI 15 M0	RE 15 M1	R 15 M0
IIIб	REI 60 M1	REI 30 M1	E 15, M0 E 30, M1	EI 15 M1	R 60 M1	R45 M0	REI 45 M1	RE 15, M0 RE 30, M1	R45 M1
IV	REI 30 M1	REI 15 M1	E 15 M1	EI 15 M1	R30 M1	R 15 M1	REI 15 M1	Не нормуються	
IVa	REI 30 M1	REI 15 M1	E 15 M2	EI 15 M1	R 15 M0	R 15 M0	REI 15 M0	RE 15 M2	R 15 M0
V	Не нормуються								

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:

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

де M_{ϕ} – 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_n – 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. Аналіз методу натурних випробувань

Експериментальний метод є нині найпоширенішим та надійнішим методом визначення меж 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 конкретизовані вимоги методу натурних вогневих випробувань будівельних конструкцій 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.



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. Дані випробування [9] відбулися в Денвері у 1890 році. Від того періоду 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) [9].



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

В розрізі наукових досліджень в Україні виконали декілька натурних вогневих випробувань (таб.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 ГОЛЬДПІАН 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. Дослідження методу вогневих випробувань у печах несучих залізобетонних стін

Більшість методів випробування на вогнестійкість різних видів будівельних конструкцій, базуються на загальних стандартних положеннях. Варто зазначити, що відмінності у номенклатурі випробовуваних будівельних конструкцій, в мінімально допустимих розмірах фрагментів 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 вертикальної вогневої установки для виконання експерименту на вогнестійкість несучих стін [13].

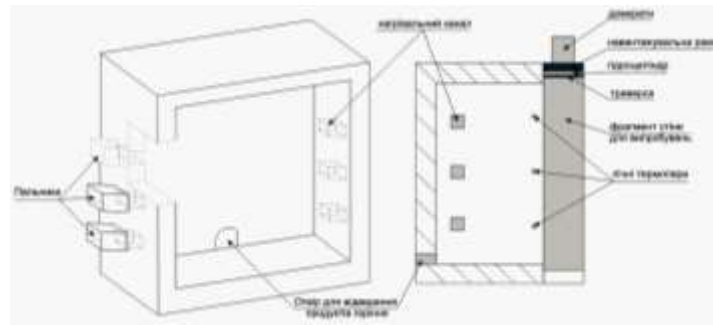


Рисунок 1.4. Схема вертикальної вогневої установки для виконання експерименту на вогнестійкість несучих стін [13]

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.

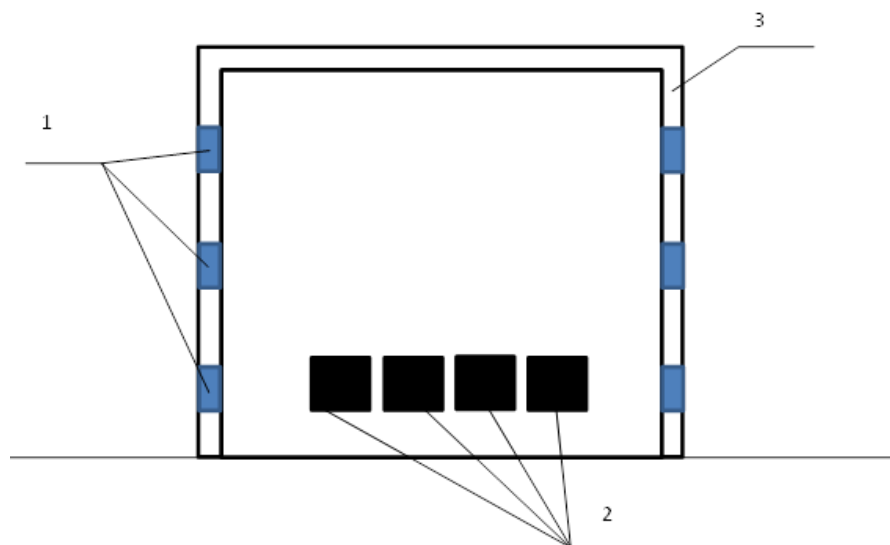


Рисунок 1.5. Вертикальна вогнева піч для виконання випробувань на вогнестійкість несучих стін: 1 – отвори для встановлення пальників, 2 – отвори для видалення продуктів горіння; 3 – стіни камери вогневої печі

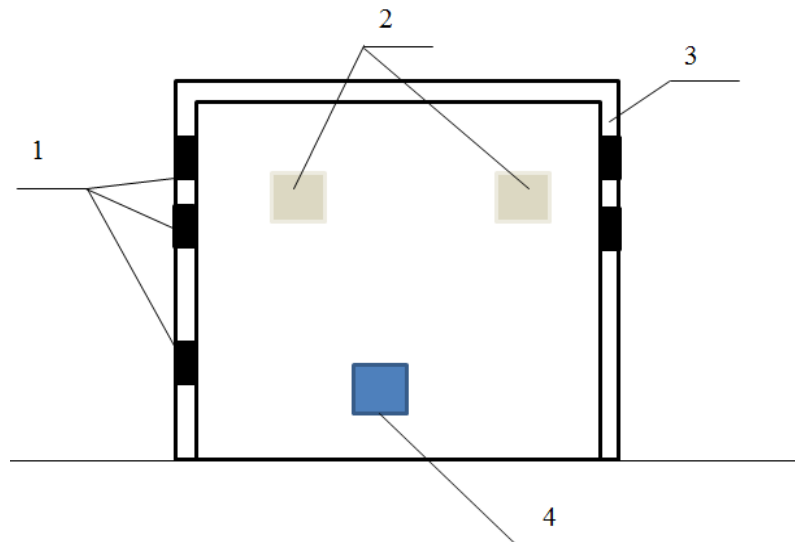


Рисунок 1.6. Вертикальна вогнева піч для виконання випробувань на вогнестійкість несучих стін: 1 – отвори для пальників; 2 – оглядові вікна; 3 – стіни вогневої печі; 4 – отвір для видалення продуктів горіння

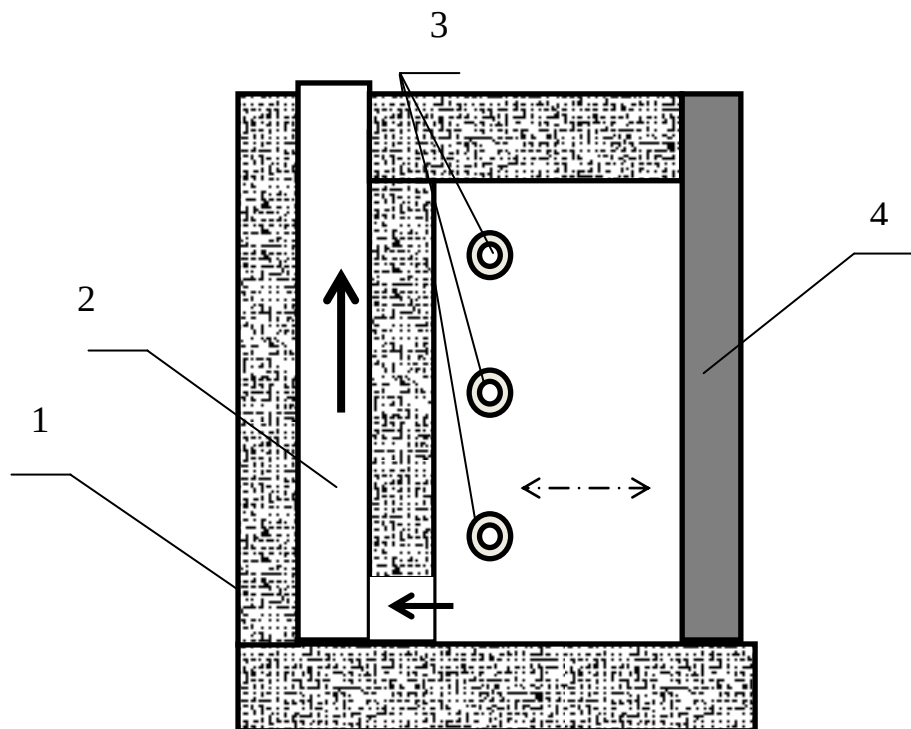


Рисунок 1. 7. Вертикальна вогнева піч для виконання випробувань на вогнестійкість несучих стін: 1 – корпус печі; 2 – канали видалення продуктів згорання; 3 – пальники; 4 – фрагмент, що випробовується

Геометричні параметри вогневих печей повинні забезпечувати можливість виконання випробовування фрагментів, проєктні розміри яких повинні відповідати елементам будівельних конструкцій. Якщо це неможливо зробити, системою стандартів [1,2,7] 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 чим 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]:

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

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 обігрівних поверхонь.

Проаналізувавши нормативні документи [1, 2, 6], слід зазначити, що встановлені вимоги мають низку недоліків. Не зазначені такі вимоги: мінімальні розміри фрагмента, який випробовують; характеристики для визначення рівномірності обігрівання випробовуваних фрагментів; 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 фрагментів 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 [1, 2, 6]. У технічній документації [1, 2, 6] наведені значення, яким повинно відповідати навантаження, що встановлюють, на основі умови створення в розрахункових перерізах фрагментів напруг, а також необхідно забезпечити умови, щоб вантажі не зміщувались під час деформації фрагмента.

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 випробовуваного фрагмента 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 випробовуваного елемента 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 фрагментів несучих стін, які випробовують. Для визначення деформаційно-силових характеристик напруженого стану будівельних фрагментів під час випробування до II групи належать контрольно-вимірювальні прилади. До III групи належать прилади, які призначені для контролю настання граничного стану, а саме втрати цілісності [1, 2, 5].

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

Для контролю температури на обігрівних поверхнях фрагментів 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 $0,1 \text{ м}^2$, 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 термопари має бути зварений та знятий на довжині не менше 25 мм. Показана схема термопари із захисним кожухом на рис. 1.8.

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

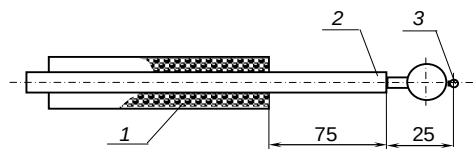


Рисунок 1.8. Схема термопари для виконання вогневих випробувань: 1 – теплозахисний кожух; 2 – захисний оболочка; 3 – вимірювальний спай

Таблиця 1.3 – Параметри термопар

Призначення	Діаметр дроту, мм	Тип термопари	Діапазон вимірювання, °C	Похибка, °C
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 випробовуванням, 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 фрагментів 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 фрагментів під час вогневого випробування з прикладанням механічного навантаження. Перш за все вимірюють поздовжні і поперечні переміщення фрагмента 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-вимірювальних деформаційно-силових приладів, а саме: вимоги щодо визначення точності приладів силових навантажень, не зазначені; не відомо 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 [1, 2, 5]. Для цього використовують ватний тампон, який виготовляють з м'якої нефарбованої бавовняної вати розмірами 100×100×20 мм, в складі якого не повинно бути ніяких інших волокон. Перед випробуванням, протягом не менше 30 хв, тампон має бути висušений за температури $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, після сушіння його маса повинна бути від 3 до 4 г [1, 2, 5].

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 вимірювальної техніки, які зазначені в табл.1.5.

Таблиця 1.5 – Засоби вимірювальної техніки для виконання вогневого випробування

№ п/п	Найменування обладнання або приладу	Діапазон вимірювання
1.	Лінійка вимірювальна (інв. №4)	від 0 до 1000 мм
2.	Секундомір СОСпр-26-2-010 (інв. №13)	від 0 до 60 хв
3.	Система контролю температури на основі блоків Вега-5 (інв. №26)	від -5 до 1300°C
4.	Термопари ТХА, 14 одиниць (інв. 07-020)	від 0 до 1100°C
5.	Термопари N (1100 мм), 6 одиниць (інв. №047-052)	від 0 до 1200°C
6.	Термогігрометр АРТ-06917 (інв. №2)	від 25 до 90 % від 0 до 50°C
7.	Штангенциркуль ЩЦ-ІІа (інв. №11)	від 0 до 300 мм

Продовження таблиці 1.5

№ п/п	Найменування обладнання або приладу	Діапазон вимірювання
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: 6мм (інв. №9) 25мм (інв. №10)	6 мм 25 мм
12.	Disto D3a BT (інв. №18) віддалемір лазерний ручний	від 0,05 до 100м
13.	Disto D3a BT (інв. №17) віддалемір лазерний ручний	від 0,05 до 100м

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

Також проведення 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 [1, 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.

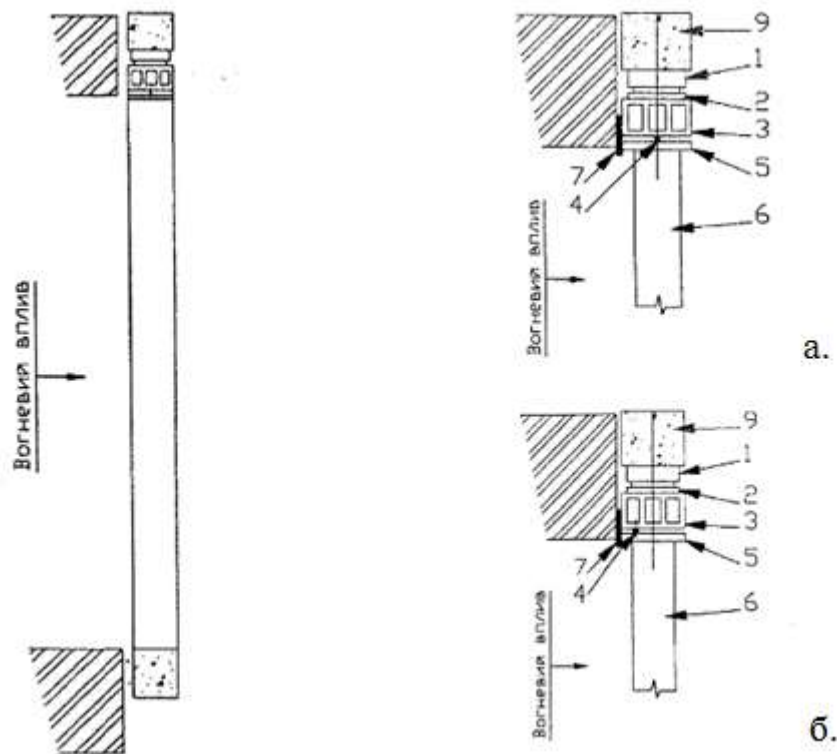


Рисунок 1.9. Схема прикладення до стінового елемента навантаження без ексцентриситету (а) та з ексцентриситетом (б) під час його випробування на вогнестійкість: 1 – гідравлічний домкрат; 2 – динамометр; 3 – траверса; 4 – прут 15×15 мм; 5 – основа; 6 – фрагмент для випробування; 7 – волокниста ізоляція;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

Зараз існують серйозні технічні труднощі, для створення зазначених умов в реальних установках – це те, що 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 стін

Альтернативою методам оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін за допомогою стандартних вогневих випробувань є розрахункові методи, які застосовують для проектування 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 I роду та граничні умови II роду, 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 обширний 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 проєктних 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 пожежі та вуглеводневої, та стандартний температурний режим.

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. В 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 пожежі	Так Криві розподілу температур та знижені властивості матеріалів наведені для стандартного температурного режиму пожежі	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 пожежі	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 [19].

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°C) в стисненій зоні поперечного перерізу. Пошкоджений бетон (з температурою більшою ніж 500°C) вважається таким, що не забезпечує несучу здатність елемента, його вилучають з розрахунку, в той час, як умовний поперечний переріз зберігає свої початкові значення міцності та модуля пружності.

Для визначення розрахункового поперечного перерізу товщину пошкодженого бетону a_{500} за ізотерми 500°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°C до 460°C . Значення 1,1 для класу 1 є рекомендованим [19] та для класу 2 – 1,3. Для класу 3 необхідно використовувати більш точний метод ізотерми.

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 пожежі. 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.

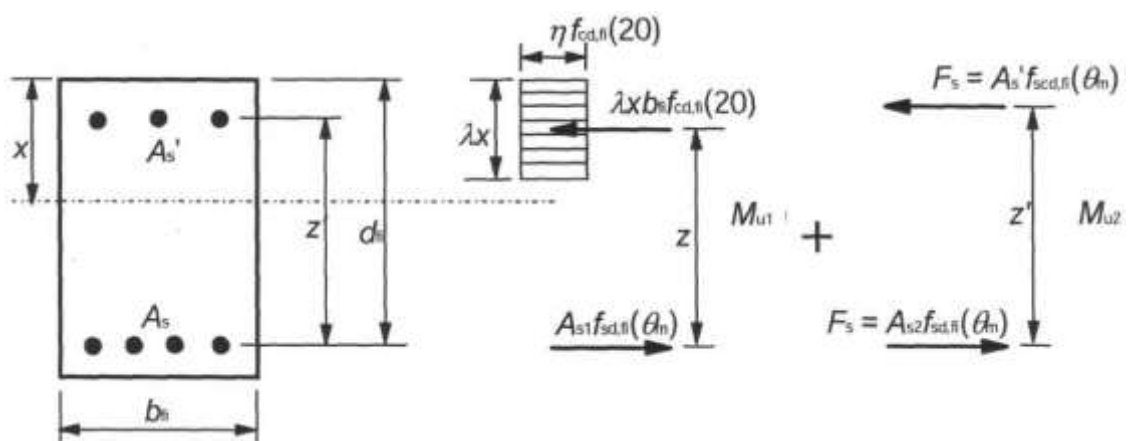


Рисунок 1.10. Розрахункова схема умовного перерізу: b_{fi} – ширина перерізу; d_{fi} – робоча висота перерізу; A_s – площа розтягнутої арматури; A'_s – площа стиснутої арматури; $f_{cd,fi}(20) = f_{ck}/\gamma_{c,fi}$ – розрахункова міцність бетону на стиск за

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 обраховують 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 будівельних конструкцій 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 країн Європи [19].



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

Але ці методи [17,18] 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. В деяких випадках за табличного методу чи методу критичної температури навіть не враховують діючі навантаження.

Також альтернативні 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]:

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

де M_T, N_T – поздовжня сила і зовнішні головні момент 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]:

$$\begin{aligned}\sigma_{bi} &= f_1(\varepsilon_{bi}), \sigma_{sj} = f_2(\varepsilon_{si}), \\ \varepsilon_{bi} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{bi}, \\ \varepsilon_{si} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{sj},\end{aligned}\tag{1.9}$$

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]:

$$\alpha = \alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{к}} \quad (1.12)$$

де $\alpha_{\text{в}}$ – коефіцієнт теплообміну від випромінювання;

$\alpha_{\text{к}}$ – коефіцієнт теплообміну конвекцією.

1.5. Аналіз експериментально-розрахункових методів оцінювання вогнестійкості несучих стін

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 фрагментів, 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

випробовуваних бетонних фрагментів за різних геометричних умов та конфігурацій самих фрагментів. 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.

В 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 даний 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 фрагменти, які моделюють внутрішні шари бетону. Кожний із фрагментів 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 виходячи з простих математичних виразів, 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 фрагментів для випробувань, що обумовлює необхідність додаткового обчислення від цих фрагментів до реальних конструкцій. Відсутність єдиних вимог є іншим серйозним недоліком відносно експериментального обладнання для реалізації режиму випробувань.

1.6. Мета і завдання дисертації

Мета проведення досліджень полягає у підвищенні ефективності методу, що об'єднує експериментальний та розрахунковий підходи до оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін шляхом створення удосконаленого алгоритму, розроблення засобів випробувань та обґрунтування розрахункового математичного апарату інтерпретації результатів на реальні об'єкти.

Для досягнення поставлених цілей були сформовані такі завдання:

1. Проаналізувати актуальні наукові праці та нормативні документи щодо вимог з оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін. Визначити шляхи удосконалення експериментально-розрахункового методу.

2. Науково обґрунтувати та створити комп'ютерні моделі для описування процесу тепломасообміну у малогабаритній вогневій випробувальній установці. Визначити шляхи удосконалення конструкції та конфігурації установки.

3. Виконати експериментальні дослідження стандартного температурного режиму пожежі на залізобетонну стіну із застосуванням

удосконаленої малогабаритної вогневої установки. Перевірити адекватність отриманих результатів.

4. Обґрунтувати алгоритм та виконати розрахунок напружено-деформованого стану залізобетонної стіни на основі результатів отриманих експериментальних досліджень.

5. Розробити удосконалений експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін на основі випробування їхніх досліджуваних фрагментів у малогабаритних вогневих установка та проведення подальшого розрахунку міцності.

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, залежить не від апіорних припущень динаміка розвитку процесів, 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.

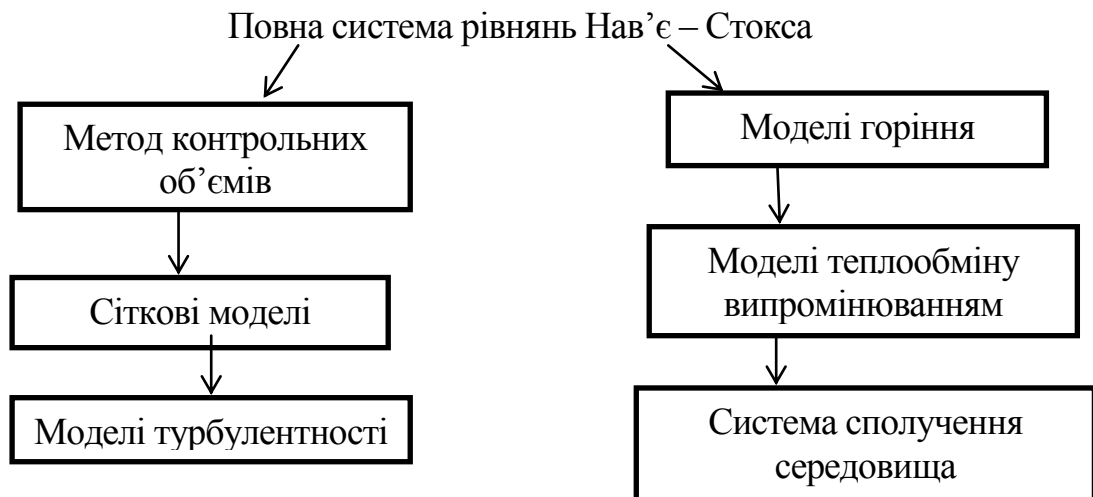


Рисунок 2.1. Теоретична база для розв'язку задач теплообміну у вогневих печах

Для цих цілей використовують фундаментальні рівняння [51]:

- 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.

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

Математичні моделі, що існують, їх чисельна реалізація дають змогу ефективно та точно змодельовати 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 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. Це 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 їхніх розв’язань необхідно розглянути теплові процеси, що відбуваються у приміщенні під час пожежі, умови теплообміну на поверхні досліджуваної конструкції та теплофізичні параметри у внутрішніх шарах конструкції. Вище зазначені 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.

Задачу із визначення розподілу температур під час пожежі у вертикальних будівельних конструкціях 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, випаровування води у порах матеріалу та фільтрацією, в процесі розв’язання задачі теплопровідності, а також витрати теплової енергії в цементному камені на дегідратацію [44, 56 – 62].

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, спостерігання якісної картини явища, вимірювання фізичних величин [63].

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 [63].

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. Таким чином, обчислювальний експеримент відіграє важливу роль у процесах наукових досліджень.

Розвиток чисельних методів стимулював системне застосування комп'ютерної техніки. Чисельні методи лягали в основи 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.

Суть чисельного експерименту полягає в тому щоб температурний режим нагрівання термопар якомога точно збігався з стандартним температурним режимом 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».

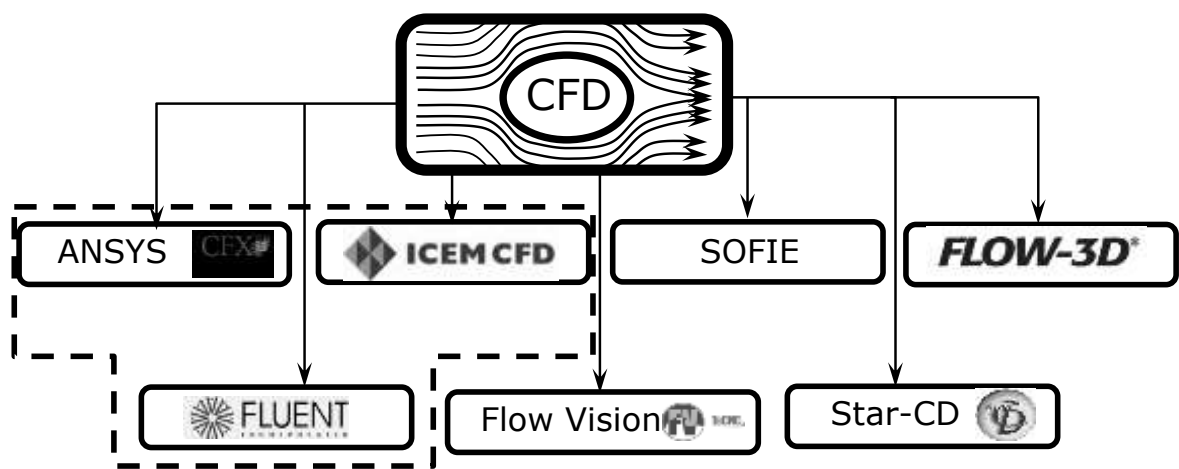


Рисунок 2.2. Сімейство програмних продуктів «CFD», які поширені в Україні

Який саме програмний комплекс використовувати, залежить від особливостей модельованих процесів користувача та можливостей обчислювальної техніки. У розділі 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 термопарою 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 підвищивши точність виконання випробувань.

Нижче проаналізовано та зазначено основні характеристики CFD-програм.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики CFD-програм

№	Назва	Опис	Підтримка модуля програми	Країна-виробник та ціна ліцензії
1.	ANSYS Fluent	ANSYS Fluent – це програмне забезпечення для моделювання та чисельного аналізу різних процесів, пов'язаних з рухом рідин, тепломасообміном і хімічними реакціями. Ця програма використовує методи розрахунку на основі скінченних елементів для вирішення різних задач, пов'язаних з рухом рідин, таких, як течія через труби, струмені, обтікання тіл, термодинаміка рідин та інше. ANSYS Fluent використовують в різних галузях, а саме: машинобудування, авіаційна та космічна промисловість, енергетика	Моделювання руху рідин і газів разом з стаціонарними та нестаціонарними течіями. Розв'язання різних задач тепломасообміну, таких, як теплообмін через стіни, конвекційний тепловий потік, тепла радіація та інші. Розв'язання задачі турбулентної течії з використанням різних моделей турбулентності, таких, як модель k-ε, модель k-ω, Large Eddy Simulation (LES) та деякі інші. Моделювання хімічних реакцій, а саме: згорання, розклад та інші процеси. Різноманітні інструменти візуалізації та пост-процесінгу, такі, як відображення векторів, контури, анімації та графіки.	США, Пенсільванія, Кенонсберг. Ціна: треба уточнювати по факту замовлення Сайт: https://www.ansys.com/products/fluid/s/ansys-fluent

Продовження таблиці 2.1

№	Назва	Опис	Підтримка модуля програми	Країна-виробник та ціна ліцензії
2.	OpenFOAM	OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) – це вільний програмний комплекс для розрахунку задач гідродинаміки, теплообміну, турбулентності та інших фізичних явищ методом чисельного моделювання. OpenFOAM має велику кількість модулів та інструментів для різних типів розрахунків, таких, як турбулентні потоки, мультифазні потоки, теплові розрахунки, акустика та інші. Крім того, OpenFOAM має гнучку систему налаштування, яка дозволяє змінювати та доповнювати існуючі модулі під потреби користувачів. OpenFOAM широко використовують в різних сферах.	Моделювання руху рідини і газу: програма може розраховувати потік рідини і газу через різні геометрії і змінювати параметри рідини, такі, як тиск, температура і швидкість. Моделювання теплопередавання – OpenFOAM може бути використання для розрахунку теплопередавання в різних конфігураціях, наприклад, для моделювання процесів зварювання. Моделювання турбулентності: програма має вбудовані моделі турбулентності, які дозволяють розрахувати потік рідини або газу в умовах турбулентності. Моделювання хімічних реакцій – OpenFOAM: дозволяє моделювати хімічні реакції, які відбуваються в рідині або газі, наприклад, процеси спалювання.	Великобританія, Бірмінгем Ціна: безкоштовна з відкритим кодом, але для комерційного використання є платна підтримка в рік від 800\$ до 10 000\$ залежної від потреб Сайт: https://www.openfoam.com

Продовження таблиці 2.1

№	Назва	Опис	Підтримка модуля програми	Країна-виробник та ціна ліцензії
3.	Star-CCM+	Star-CCM+ – це програмний комплекс для чисельного моделювання та розв'язання задач гідродинаміки, теплообміну, механіки руйнування та інших задач фізики реального середовища. Він розроблений компанією CD-Adapco (з 2017 року - Siemens PLM Software) і забезпечує зручний і потужний інтерфейс для побудови складних геометрій та обчислювальних сіток, моделювання турбулентного руху рідин: множинні фази, теплообмін, розчинення речовин та інші складні фізичні явища	Моделювання течій рідин і газів включно з турбулентними. Розв'язування задач теплообміну і термодинаміки. Моделювання механічних процесів включно з рухом твердих тіл. Моделювання процесів зміни фаз. Взаємодія з CAD-системами. Оптимізація параметрів проєкту. Моделювання протікання рідини через пористі середовища. Моделювання гідродинаміки струменів. Моделювання процесів горіння та викидів. Моделювання взаємодії твердих тіл з рідинами та газами. Моделювання хімічних реакцій	США, Каліфорнія, Конкорд. Ціна: треба уточнювати за фактом замовлення. Сайт: https://www.cd-adapco.com/products/star-ccm-plus
4.	Autodesk CFD	Autodesk CFD – це програмний комплекс для чисельного розв'язування задач	Моделювання термодинаміки та гідродинаміки: дозволяє моделювати різноманітні термічні та гідродинамічні	США, Каліфорнія, Сан-Рафаель Ціна: ліцензія на одного користувача на

		теплопередачі, механіки рідин і газів, а також задач на міцність, який використовують для моделювання та аналізу різноманітних інженерних систем. Autodesk CFD дозволяє виконувати розрахунки на основі різних методів: метод обмеженого об'єму, метод скінченних елементів та метод скінченних різниць. Крім того, програма має велику бібліотеку матеріалів, яка містить дані про фізичні властивості різних речовин, що дозволяє виконувати точні моделювання різноманітних процесів. Autodesk CFD має широке застосування в різних галузях: таких як автомобільна, авіаційна, енергетична, хімічна промисловість та інші.	процеси в системах різної складності, включно з конвекцією, дифузією, теплообмін та інші фізичні явища; Моделювання турбулентності: дозволяє моделювати турбулентні потоки, що виникають в різних інженерних системах, зокрема, в системах вентиляції та кондиціонування повітря, гідротехнічних спорудах тощо. Моделювання хімічних реакцій: дозволяє моделювати хімічні реакції в системах з різним складом, зокрема, в системах очищення води, зварювання та оброблення металів, виробництва хімічних реагентів тощо. Моделювання механіки руйнування: дозволяє моделювати механіку руйнування матеріалів та конструкцій, зокрема під час проектування автомобільних кузовів, літаків, елементів машинобудування тощо.	рік 4 000\$ Сайт: https://www.autodesk.com/products/cfd/overview
--	--	--	--	--

Продовження таблиці 2.1

№	Назва	Опис	Підтримка модуля програми	Країна-виробник та ціна ліцензії
5.	«Fire Dynamics Simulator»	Це обчислювальна гідродинамічна модель (CFD) моделі потоку рідини, що викликається полум'ям. Комп'ютерна програма чисельно вирішує моделювання великих вихрів форми рівнянь Нав'є - Стокса, придатних для низько швидкісного потоку з тепловим приводом, з акцентом на дим та перенесення тепла від пожеж для опису розвитку пожежі	Моделює розподіл температури, концентрації продуктів згоряння, таких, як дим, та інших хімічних речовин у просторі залежно від впливу вогню та систем вентиляції. Моделює швидкість розповсюдження вогню у просторі. Він враховує такі фактори, як витрати палива, характеристики матеріалів, які горять, аеродинамічні умови і фізичні параметри вогню. Моделює рух повітря, вентиляційні отвори, димові канали і системи димових витяжок, що дозволяє аналізувати шляхи розповсюдження диму та розташування можливих зон небезпеки. Надає можливість аналізувати результати моделювання, такі, як розподіл температури, концентрації продуктів згоряння, швидкості розповсюдження вогню тощо. Візуалізація здійснюється у вигляді тривимірних графіків, діаграм.	США. Ціна: Безкоштовний доступ

Продовження таблиці 2.1.

№	Назва	Опис	Підтримка модуля програми	Країна-виробник та ціна ліцензії
6.	«CFD FlowVision»	CFD FlowVision" – це комерційне програмне забезпечення для обчислення та моделювання комп'ютерної гідродинаміки (CFD - Computational Fluid Dynamics). У теоретичній базі системи «FlowVision» для розв'язання системи рівнянь використовують метод контрольних об'ємів	Дозволяє моделювати течії рідин і газів у різних промислових та інженерних застосуваннях. Вона враховує різні фізичні явища, такі, як турбулентність, конвекція, перенесення тепла, хімічні реакції тощо. Множинна фізика та взаємодія: "CFD FlowVision" дозволяє моделювати взаємодію між різними фізичними процесами, наприклад, взаємодію між течією рідини та теплопередачею, або взаємодію між течією рідини та хімічними реакціями. Налаштування моделей та розширення їхньої функціональності відповідно до конкретних потреб користувача. Вона підтримує різні типи граничних умов, сіток, моделей турбулентності тощо. Для візуалізації та аналізу результатів моделювання, такі, як тривимірні візуалізації, розподіл величин, діаграми, графіки тощо	Ціна: треба уточнювати по факту замовлення

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. Аналіз комп'ютерних моделей тепломасообміну у вогневих печах під час виконання випробування з нагрівання несучих залізобетонних стін

У попередніх розділах обґрунтовано, що сучасне програмне забезпечення, зокрема моделювання теплообміну засобами обчислювальної газогідродинаміки («CFD»), дає змогу враховувати необхідні параметри аналізованих процесів 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. Програма є загальнодоступним програмним забезпеченням. Тому було обрано для моделювання польових моделей саме FDS.

В роботі [64] детально вивчено та зазначено особливості програмного комплексу FDS, який може бути використано для вирішення широкого спектру наукових і прикладних задач тепломасопобміну в умовах пожежі, наприклад, для розрахунку вогнестійкості конструкцій, часу блокування шляхів евакуації, часу спрацювання датчиків, спринклерів тощо. Оскільки модель не вимагає попередніх припущень про структуру потоку, її можна використовувати для моделювання будь-яких об'ємно-планувальних рішень. Дана 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 температурно-залежних потоків FDS чисельно вирішує рівняння Нав'є – Стокса, особливу увагу приділяють поширенню диму та теплопередаванні 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, які 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 зобов'язані бути прямокутними.

Сітка: повинна відповідати таким умовам, де 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.

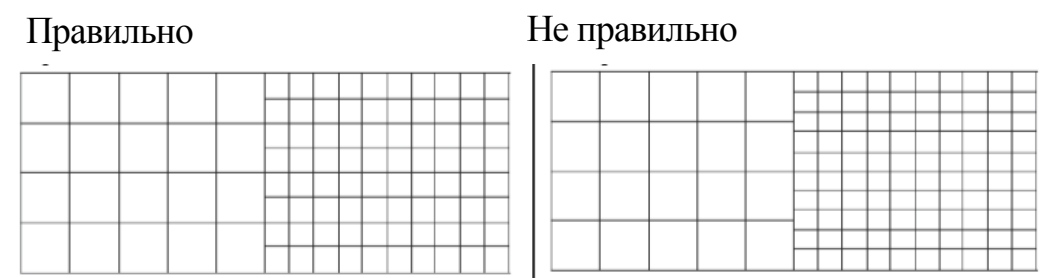


Рисунок 2.3. Визначення конфігурації розташування комірок у сітці

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 рівняння 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, уможливорює 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 валідності результатів 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].

В 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 мм та 1 200 мм, а також пальники в кількості 4 та 6 шт.

У вище зазначеній роботі продемонстровано результати чисельного моделювання низки комп'ютерних конфігурацій установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції. З результатів цієї роботи