

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
Національний університет цивільного захисту України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Степаненко Віталій Олександрович

УДК 614.84

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ
СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ З ГОФРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ**

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.



В. О. Степаненко

Науковий керівник: **Нуянзін Олександр Михайлович**
доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Степаненко В. О. Удосконалення методу оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2025.

Актуальність теми. У сучасному будівництві набуло широкого поширення застосування сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, які поєднують в собі переваги сталевих та залізобетонних конструкцій. Однак, оцінювання їхньої вогнестійкості здебільшого здійснюється розрахунковими методами, що, з огляду на композитну природу таких плит та значну варіативність їх складу, часто не дає достовірних результатів. Це ускладнює забезпечення нормативного рівня пожежної безпеки об'єктів будівництва та ефективного реагування рятувальників в умовах надзвичайних ситуацій.

Особливої актуальності дана задача набуває в умовах обмеженого доступу до великогабаритних вогневих печей для експериментального оцінювання вогнестійкості конструкцій у різних регіонах України. Це зумовлює необхідність розробки методик, адаптованих до використання малогабаритних вогневих установок, які дозволяють проводити експериментальні дослідження без транспортування зразків на великі відстані.

Аналіз праць провідних дослідників у галузі вогнестійкості будівельних конструкцій, зокрема С. В. Поздєєва, О. М. Нуянзіна, П. Г. Круковського, В. В. Ніжника, В. Barteleml, Т. Harmathy та ін., свідчить про значні досягнення у створенні підходів до визначення межі вогнестійкості залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій. Проте, використання відомих методик не забезпечує високу достовірність отриманих результатів, що пов'язано з анізотропністю процесів у залізобетоні та недосконалістю розрахунків за спрощеними методиками.

Таким чином, удосконалення методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем із застосуванням малогабаритних вогневих печей є актуальним науковим завданням, що сприятиме підвищенню достовірності оцінки вогнестійкості та, як наслідок, надійності таких конструкцій.

Ідея роботи полягає в створенні удосконалень для розрахунково-експериментального методу оцінки межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит, що не знижуючи точності та надійності підвищить екологічність, економічність та знизить трудомісткість у порівнянні з повномасштабними випробуваннями на вогнестійкість та буде більш достовірним за існуючі експериментально-розрахункові та розрахункові методики з метою гарантування нормативної стійкості конструкцій у разі пожежі. Це можливо досягнути завдяки проведенню нагрівання малогабаритних фрагментів без застосування механічного навантаження (з урахуванням особливостей одностороннього теплового впливу та раціонального розміщення точок вимірювання температури всередині зразків) та врахування реальних геометричних параметрів конструкцій під час подальших розрахунків температурних полів і несучої здатності повномірних конструкцій.

Об’єкт дослідження – процеси нагрівання та деформації елементів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем у ході оцінювання їхньої вогнестійкості.

Предметом дослідження – експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем на основі нагрівання фрагментів у малогабаритних вогневих печах.

Мета – виявлення закономірностей нагрівання та втрати міцності сталезалізобетонними плитами з гофрованим профілем за умов пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення експериментально-розрахункового методу такої оцінки.

Для досягнення поставленої мети були сформовані завдання:

1. Проаналізувати сучасні методи експериментального та розрахункового оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит, виявити їхні переваги та обмеження, визначити науково-практичні передумови до розроблення удосконаленої методики оцінювання вогнестійкості.
2. Створити комп'ютерні моделі процесів тепломасообміну у сталезалізобетонних плитах з гофрованим профілем під впливом пожежі та описати алгоритм побудови моделей теплового впливу на конструкції у вогневих печах засобами CFD-програмних комплексів.
3. Розробити методику та провести експериментальні дослідження з нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит у малогабаритній вогневій печі за стандартним температурним режимом пожежі, а також систематизувати результати температурних вимірювань у контрольних точках.
4. Обґрунтувати розрахункову частину методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем шляхом створення розрахункового алгоритму визначення температурних полів усередині конструкції на основі точкових температурних вимірювань, отриманих під час експерименту.
5. Розробити алгоритм інтегрування експериментальних та розрахункових даних у метод оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем та обґрунтувати подальший розрахунок її несучої здатності з урахуванням фактичних геометричних розмірів, просторової орієнтації й прикладеного навантаження.

Наукова новизна дисертації полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання щодо вивчення закономірностей нагрівання та втрати міцності сталезалізобетонними плитами з гофрованим профілем за умов пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення експериментально-розрахункового методу такої оцінки. Запропоновано підхід, який враховує специфіку передачі тепла у багат шарових матеріалах та можливість застосування малогабаритних вогневих установок для локального нагрівання фрагментів без необхідності масштабних

випробувань, що є особливо актуальним у контексті післявоєнної відбудови та економії ресурсів.

Отримані такі основні наукові результати:

Уперше:

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що у діапазоні ребер сталевих профілів до 52 мм під час нагрівання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем за стандартним температурним режимом пожежі рівномірність прогріву арматури не залежить від глибини та кроку гофрованої частини;

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що положення сталезалізобетонної плити (горизонтальне чи вертикальне) під час теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі у малогабаритній вогневій печі не впливає на рівномірність температурного поля по поверхні гофрованого сталевих профілів, а також на результати теплотехнічних випробувань загалом, що підтверджено максимальним відхиленням, яке не перевищує 5 %.

Удосконалено:

- експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із гофрованим профілем, що відрізняється від існуючих врахуванням особливості теплопередачі у сталевому профілі та залізобетоні під час впливу температурного режиму пожежі, а також геометрії поверхні гофрованого профілів, передачі тепла у композитних матеріалах, що можливо здійснити за рахунок застосування малогабаритних вогневих установок для нагрівання фрагментів – без необхідності повномасштабних випробувань – із подальшою екстраполяцією результатів на реальні розміри навантажених конструкцій за допомогою обчислень;

- підхід до моделювання температурного поля в поперечному перерізі сталезалізобетонної плити при тепловому впливі, без зниження точності отриманих результатів, шляхом застосування методу інтерполяції експериментальних даних, що у порівнянні з традиційними методиками дозволяє зменшити кількість

необхідних місць контролю температури до 9 у будівельній конструкції та 2 у камері печі, одночасно враховуючи геометричні особливості профілю плити та параметри армування;

— конструкцію малогабаритної вогневої установки шляхом введення додаткових конструктивних елементів контролю температурного режиму та енергоефективності, що дозволило підвищити якість процесу нагрівання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, сприяло більшій екологічності, економічності та зниженню трудомісткості проведення випробувань.

Набуло подальшого розвитку застосування експериментально-розрахункових методів оцінки межі вогнестійкості для вирішення задач із оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, що ураховує просторову структуру гофрованої основи профілю та дозволяє підвищити точність і достовірність визначення межі вогнестійкості таких будівельних конструкцій.

Практичне значення. Полягає у розробленні ефективної експериментально-розрахункової методики оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, яка дозволяє зменшити обсяги повномасштабних вогневих випробувань за рахунок використання малогабаритних вогневих установок без втрати точності оцінювання; адаптувати метод до різних типів плит у діапазоні ребер сталевих профілів до 52 мм з урахуванням реального армування, геометрії та умов теплового навантаження; підвищити точність розрахунку температурних полів та міцності елементів конструкції під час дії пожежі; інтегрувати запропоновану методику у практику інженерних розрахунків з використанням ПЗ Mathcad та ANSYS, що сприяє автоматизації процесу визначення межі вогнестійкості; удосконалити нормативно-технічну базу щодо випробувань та проектування залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Усі положення, які винесені на захист, та результати досліджень наведено в роботах [1–16], з яких роботи [1, 11–15] опубліковано здобувачем самостійно.

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

– Система захисту модульних укриттів від зіткнень з автотранспортом: пат. 160549 Україна. № 202405340; заявл. 12.11.2024; опубл. 17.09.2025, Бюл. № 38. 120 с.

Результати дослідження впроваджено в:

– діяльність ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича компанія «Спецзахист» – розроблені й запропоновано новації мають цінність для процесу проведення та оцінки на вогнестійкість сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, що застосовують, зокрема, під час будівництва об'єктів критичної інфраструктури та захисних споруд цивільного захисту (акт упровадження від 30.09.2025);

– у роботу 3 Спеціалізованого центру швидкого реагування ДСНС України за рахунок розробки алгоритму застосування удосконаленої експериментально-розрахункової методики, включаючи підготовку зразків, проведення випробувань, обробку даних інтерполяції, розрахунок міцності та валідацію точності результатів на основі порівняння з науковими джерелами та експериментальними даними (акт упровадження від 02.10.2025);

– в освітній процес Національного університету цивільного захисту України, що, підвищує якість лекційних і практичних занять для здобувачів вищої освіти (акт упровадження від 14.10.2025).

Методи досліджень. Теоретичні дослідження проведено на основі систем диференціальних рівнянь неперервних середовищ типу рівнянь Нав'є – Стокса, рівнянь теплопровідності та напружено-деформованого стану залізобетону в умовах нагріву під час пожежі й рівнянь теплопровідності Фур'є. Для розв'язку рівнянь у роботі використано метод кінцевих або граничних елементів, оптимізаційні методи, а також методи статистичного оброблення експериментальних і розрахункових даних. Експериментальні дослідження виконано за допомогою малогабаритної вогневої установки.

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 виконано аналіз сучасних підходів до оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит, зокрема тих, що мають гофрований профіль. Вивчено як експериментальні, так і розрахункові методи, які використовуються в Україні та за кордоном. Окреслено проблеми, пов'язані з точністю, складністю та вартістю існуючих методик. Визначено потребу в удосконаленні підходів до визначення межі вогнестійкості з урахуванням особливостей реальних конструкцій, умов пожежі та впливу механічного навантаження. Сформульовано мету і завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі проведено дослідження теплових процесів, що відбуваються у сталезалізобетонних плитах з гофрованим профілем під час впливу пожежі. Для цього використано методи комп'ютерного моделювання в програмних комплексах CFD. Детально проаналізовано особливості побудови обчислювальних сіток, вибору граничних умов та формування конфігурації моделей. Проведено моделювання температурного впливу на конструкції за різних сценаріїв, що дозволило визначити закономірності розподілу температур у перерізах плит та зробити висновки про їхню теплотехнічну поведінку.

У третьому розділі розроблено експериментальну методику проведення вогневих випробувань фрагментів сталезалізобетонних плит у спеціально створеній малогабаритній вогневій установці. Визначено вимоги до параметрів печі, конфігурації нагріву, характеристик датчиків і способів монтажу зразків. Описано процес виготовлення фрагментів плит, їхнє витримання в нормальних умовах та подальше нагрівання. Описано хід проведення експерименту та його результати. Зафіксовано температурні значення в контрольних точках перерізу, що стало основою для подальших розрахунків. Отримані дані підтвердили доцільність використання спрощеної моделі випробувань для дослідження вогнестійкості.

У четвертому розділі представлено вдосконалену методику оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит, яка передбачає побудову температурного поля за даними точкових вимірювань у малогабаритній вогневій печі. Запропонований підхід дозволяє враховувати особливості профілю плити та нерівномірність нагріву без повномасштабних випробувань. Підтверджено відповідність температурного режиму стандартній пожежній кривій, незначний вплив орієнтації плити на результати, а також зменшення потреби у вимірювальному обладнанні на 30 %. Визначено межу вогнестійкості за критерієм несучої здатності (239 хвилин), що підтверджено чисельним аналізом і збігається з даними з наукових джерел, що дозволяє рекомендувати методику для практичного застосування.

У п'ятому розділі розроблено покроковий алгоритм з 9 етапів для оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, який поєднує експериментальні та чисельні методи. Представлено удосконалену схему реалізації методики з використанням малогабаритної вогневої печі, що враховує конструктивні особливості зразка та теплові умови. Обґрунтовано оптимальні параметри розмірів фрагментів, конфігурації установки, розміщення пальників та необхідність ущільнення для герметичності. Проведено розрахунок залишкової несучої здатності після впливу температурного режиму пожежі, що підтвердив ефективність підходу. Визначено перелік обов'язкових експериментальних даних для розрахунків та рекомендовано використання F-критерію Фішера для перевірки достовірності результатів.

Ключові слова: пожежа, безпека, вогнестійкість, сталь, залізобетон, плита, математична, комп'ютерна, модель, небезпека, експеримент, розрахунок, моделювання, процеси горіння, деформація, несуча здатність.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Степаненко В. О. Дослідження впливу конфігурації малогабаритної вогневої установки на рівномірність нагрівання поверхні сталезалізобетонної плити. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. №2 (18). Київ, 2024. с. 4-12. <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/download/245/179>
2. Нуянзін О. М., Іваненко О. І., Степаненко В. О., Самченко Т. В. Дослідження температурних режимів пожежі у горизонтальних кабельних тунелях в залежності від їхніх параметрів та пожежного навантаження. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Том 8. № 1. Черкаси, 2024. С. 139–150. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/200/191>
3. Іваненко О. О., Сідней С. О., Рудешко І. В., Іщенко І. І., Степаненко В. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по ребристій плиті при моделюванні пожежі. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Том 8. № 2. Черкаси, 2024. С. 121–132. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/issue/view/16>
4. Степаненко В. О., Нуянзін О. М., Перегін А. В., Кришталь Д. О., Копитін Д. Е. Результати прогріву сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем під час теплового впливу пожежі. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. НУЦЗ України. №2 (40) Харків, 2024 С. 113–125. <http://pes.nuczu.edu.ua/uk/arkhiv-nomeriv/11-ua-cat/455-stepanenko-v-o-nuyanzin-o-m-peregin-a-v-krishtal-d-o-kopitin-d-e-rezultati-progrivu-stalezalizobetonnikh-plit-z-gofrovanim-profilem-pid-chas-teplovogo-vplivu-pozhezhi>.

Публікації у наукових виданнях, що входять до бази даних Scopus та/або WoS:

1. Palchykov R., Ballo Y., Nizhnyk V., Mykhailov V., Gavryliuk A., Loik V., Synelnikov O., Synelnikov S., Stepanenko V., Nuianzin O. Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside

protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 132, No. 10. P. 37–45. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/317332>.

2. Fedchenko S., Nuianzin O., Stepanenko V., Vedula S. Modeling the Thermal Effects of Fire on Steel-Reinforced Concrete Slabs with a Corrugated Profile. *Key Engineering Materials*. 2025. T. 1028. C. 33–40. <https://www.scientific.net/KEM.1028.33>.

Патенти на корисну модель:

1. Система захисту модульних укриттів від зіткнень з автотранспортом: пат. 160549 Україна. № 202405340; заявл. 12.11.2024; опубл. 17.09.2025, Бюл. № 38. 120 с.

Матеріали науково-практичних конференцій, що засвідчують апробацію дисертації:

1. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Кайдаш В. С., Дослідження рівномірності прогріву елементів залізобетонних будівельних конструкцій у малогабаритній вогневій установці. *«Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 59–60. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21190>

2. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Янішевський В. Е. Експериментальні дослідження з нагрівання залізобетонної плити у малогабаритній вогневій печі. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф.* Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 186–187. http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22059/1/Nuianzin_2024_TPGPLNS_3_85.pdf

3. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Експериментальне дослідження з нагрівання сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем. *«Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю Черкаси: ЧПБ ім. Героїв

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21325>

4. Степаненко В. О. Метрологічна оцінка якості будівельних матеріалів для забезпечення безпеки техногенно небезпечних об'єктів. *«Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах»*: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2024. С. 106–108. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22299>

5. Степаненко В. О. Інноваційні будівельні матеріали: шлях до підвищення безпеки праці. *«Актуальні питання безпеки праці у контексті сталого розвитку та європейської інтеграції України»*: матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, 2024. С. 42-44. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22311>

6. Степаненко В. О. Забезпечення пожежної безпеки на об'єктах, що працюють з небезпечними хімічними речовинами. *«Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2025. С.351-352. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25660>

7. Степаненко В. О. Аналіз ризиків пожежної безпеки на автомобільних транспортних засобах. *«Наукова весна»*: матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції, НТУ «Дніпровська політехніка» 2025. С. 52. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25703>

8. Степаненко В. О. Аналіз впливу зміни клімату на частоту техногенних аварій *«Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України»*: матеріали XI Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С.178–179. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25704>

9. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Янішевський В. Е. Особливості створення комп'ютерної моделі нагрівання сталезалізобетонної плити у малогабаритній вогневій печі, *«Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С.324–326.
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25700>

ABSTRACT

Stepanenko V. O. Improvement of the method for assessing the fire resistance of steel–reinforced concrete slabs with a profiled (corrugated) steel sheet. – Qualification scientific work in manuscript form. Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty 261 – Fire Safety. – National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, 2026.

Abstract contents.

Relevance of the topic. In modern construction, steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile have become widely used, combining the advantages of steel and reinforced concrete structures. However, assessment of their fire resistance is mostly performed using calculation methods which, considering the composite nature of such slabs and the significant variability of their composition, often do not provide reliable results. This complicates ensuring the regulatory level of fire safety of construction facilities and effective response by rescuers under emergency situations.

This task becomes particularly relevant under conditions of limited access to large-scale fire furnaces for experimental fire-resistance evaluation of structures in various regions of Ukraine. This determines the necessity of developing methodologies adapted for the use of small-scale fire installations, which make it possible to conduct experimental studies without transporting specimens over long distances.

Analysis of the works of leading researchers in the field of fire resistance of building structures, including S. V. Pozdyeiev, O. M. Nuianzin, P. H. Krukovskiy, V. V. Nizhnyk, V. Bartelemy, T. Harmathy and others, indicates significant progress in developing approaches for determining the fire-resistance limit of reinforced-concrete and steel-reinforced concrete structures. However, the use of existing methods does not ensure high reliability of the obtained results due to the anisotropy of processes in reinforced concrete and the imperfection of simplified calculation procedures.

Thus, improving the method for assessing the fire resistance of steel-reinforced concrete slabs with a corrugated profile using small-scale fire furnaces is a relevant scientific task, which will contribute to increasing the reliability of fire-resistance assessment and, consequently, the reliability of such structures.

The idea of the work is to create enhancements for the experimental-calculation method for assessing the fire-resistance limit of steel-reinforced concrete slabs that—without reducing accuracy and reliability—will increase environmental sustainability, cost-effectiveness, and reduce labor intensity compared with full-scale fire-resistance tests, while providing higher reliability than existing calculation and experimental-calculation methodologies, to ensure the regulatory fire resistance of structures. This can be achieved by heating small-scale fragments without applying mechanical load (taking into account the specifics of one-sided thermal exposure and rational placement of temperature-measurement points inside specimens) and considering the actual geometric parameters of structures during subsequent calculations of temperature fields and load-bearing capacity of full-size structures.

Object of research – processes of heating and deformation of steel-reinforced concrete slab elements with a corrugated profile during fire-resistance assessment.

Subject of research – the experimental-calculation method for assessing the fire resistance of steel-reinforced concrete slabs with a corrugated profile based on fragment heating in small-scale fire furnaces.

Purpose – to identify the regularities of heating and strength loss of steel-reinforced concrete slabs with a corrugated profile under fire conditions as the

scientific basis for improving the experimental–calculation method for such assessment.

To achieve the set objectives, the following tasks were formulated:

1. Analyse modern experimental and calculation methods for assessing the fire resistance of steel–reinforced concrete slabs, identify their advantages and limitations, and determine scientific and practical prerequisites for developing an improved fire-resistance assessment methodology.
2. Create computer models of heat-and-mass transfer processes in steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile exposed to fire and describe the algorithm for constructing models of thermal exposure to structures in fire furnaces using CFD software packages.
3. Develop a methodology and conduct experimental studies on heating fragments of steel–reinforced concrete slabs in a small-scale fire furnace under the standard fire temperature curve, as well as systematize the temperature-measurement results in control points.
4. Substantiate the calculation part of the method for assessing the fire-resistance limit of steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile by creating a computational algorithm for determining temperature fields inside the structure based on point temperature measurements obtained during the experiment.
5. Develop an algorithm for integrating experimental and computational data into the method for assessing the fire-resistance limit of steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile and substantiate further calculation of their load-bearing capacity considering actual geometric dimensions, spatial orientation, and applied load.

Scientific novelty of the dissertation lies in solving a relevant scientific and technical problem related to studying the regularities of heating and strength loss of steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile under fire conditions as the scientific basis for improving the experimental–calculation method for such assessment. A new approach is proposed that accounts for the specifics of heat

transfer in multilayer materials and the possibility of using small-scale fire installations for local heating of fragments without the need for large-scale tests, which is especially relevant in the context of post-war reconstruction and resource conservation.

The following key scientific results have been obtained:

For the first time:

- It was theoretically substantiated and experimentally confirmed that, within the range of steel-profile ribs up to 52 mm, during heating of steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile under the standard fire temperature curve, the uniformity of reinforcement heating does not depend on the depth and spacing of the corrugated section;
- It was theoretically substantiated and experimentally confirmed that the orientation of the steel–reinforced concrete slab (horizontal or vertical) during thermal exposure under the standard fire temperature curve in a small-scale fire furnace does not affect the uniformity of the temperature field on the surface of the corrugated steel profile, nor the results of thermal-technical tests overall, which is confirmed by a maximum deviation not exceeding 5%.

Improved:

- – The experimental–calculation method for assessing the fire-resistance limit of steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile, which differs from existing ones by accounting for heat-transfer specifics in the steel profile and reinforced concrete under fire exposure, as well as the geometry of the corrugated profile surface and heat transfer in composite materials. This is achieved through the application of small-scale fire installations for fragment heating—without the need for full-scale tests—with subsequent extrapolation of results to real dimensions of loaded structures using computational methods;
- – The approach to modelling temperature fields in the cross-section of steel–reinforced concrete slabs under thermal influence without reducing accuracy by applying interpolation of experimental data, which, compared to traditional methods, allows reducing the number of required temperature-control points to 9 in the structure and 2 in

the furnace chamber while simultaneously accounting for geometric profile features and reinforcement parameters;

- – The design of the small-scale fire installation by introducing additional structural elements for temperature-mode control and energy efficiency, which improved the heating quality of steel–reinforced concrete slabs with corrugated profile and enhanced environmental sustainability, cost efficiency, and reduced labor intensity of the tests.

Further developed was achieved in applying experimental–calculation methods for assessing the fire-resistance limit to solving problems of evaluating the fire resistance of steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile, accounting for the spatial structure of the corrugated base and improving the accuracy and reliability of determining the fire-resistance limit of such building structures.

Practical significance. It lies in developing an effective experimental–calculation methodology for assessing the fire-resistance limit of steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile, which allows reducing the scope of full-scale fire tests by using small-scale fire installations without loss of accuracy; adapting the method to different slab types within the range of steel-profile ribs up to 52 mm, considering actual reinforcement, geometry, and thermal-load conditions; increasing the accuracy of temperature-field and strength calculations for structural elements during fire exposure; integrating the proposed methodology into engineering practice using software such as Mathcad and ANSYS, which promotes automation of fire-resistance assessment; improving regulatory and technical standards for testing and designing reinforced-concrete structures for fire resistance. All statements submitted for defense and research results are presented in works [1–16], of which works [1, 11–15] were published independently by the author.

All propositions submitted for defense and the research findings are presented in works [1–16], among which works [1, 11–15] were published independently by the author.

The results of the theoretical and experimental studies have been implemented in new technical solutions:

- System for protecting modular shelters from vehicle collisions: Patent No. 160549 Ukraine, Application No. 202405340; filed on 12.11.2024; published on 17.09.2025, Bulletin No. 38, 120 pages.

The research results have been implemented in:

- LLC “Engineering-Design-Production Company ‘Speczakhyst’ – the developed innovations are valuable for conducting and evaluating fire resistance of steel-reinforced concrete slabs with corrugated profiles, especially for the construction of critical infrastructure and civil protection facilities (implementation certificate dated 30.09.2025);

- 3rd Specialized Rapid Response Center of the State Emergency Service of Ukraine – through the development of an algorithm for applying the improved experimental–analytical methodology, including specimen preparation, testing, interpolation data processing, strength calculations, and validation of result accuracy based on comparison with scientific literature and experimental data (implementation certificate dated 02.10.2025);

- Educational process at the National University of Civil Protection of Ukraine, improving the quality of lectures and practical classes (implementation certificate dated 14.10.2025).

Research methods. Theoretical research was carried out based on systems of differential equations for continuous media such as the Navier–Stokes equations, heat-conduction equations, and the stress–strain state of reinforced concrete under heating during fire, as well as Fourier’s heat-conduction equation. Finite-element or boundary-element methods, optimization techniques, and statistical methods for processing experimental and calculation data were used. Experimental studies were conducted using a small-scale fire installation.

The **introduction** describes the general characteristics of the work, substantiates the relevance of the topic, outlines the connection with scientific programs and plans, formulates the aim, tasks, object and subject of research, specifies scientific novelty and practical significance, defines the author's personal

contribution, and provides information about approbation, publications, structure and volume of the work.

The **first chapter** analyses modern approaches to assessing the fire resistance of steel–reinforced concrete slabs, particularly those with a corrugated profile. Both experimental and calculation methods used in Ukraine and abroad are examined. Problems related to accuracy, complexity, and cost of existing methodologies are outlined. The need for improving approaches to determining the fire-resistance limit considering real construction features, fire conditions, and mechanical loads is identified. The aim and tasks of the dissertation research are formulated.

The **second chapter** investigates thermal processes occurring in steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile during fire exposure. CFD modelling in specialized software packages was used. Computational grid construction, boundary-condition selection, and model configuration were analysed in detail. Thermal-exposure modelling under various scenarios made it possible to identify the regularities of temperature distribution in slab cross-sections and to draw conclusions about their thermal behaviour.

The **third chapter** presents the experimental methodology for fire testing fragments of steel–reinforced concrete slabs in a specially designed small-scale fire installation. Requirements for furnace parameters, heating configuration, sensor characteristics, and mounting methods are defined. The process of fragment fabrication, conditioning, and subsequent heating is described. The experiment course and results are presented. Recorded temperature values in control points formed the basis for subsequent calculations, confirming the feasibility of using a simplified test model.

The **fourth chapter** presents the improved methodology for assessing the fire resistance of steel–reinforced concrete slabs, which involves constructing a temperature field based on point measurements in a small-scale fire furnace. The proposed approach accounts for slab-profile features and heating non-uniformity without full-scale tests. The correspondence of the thermal regime to the standard fire curve is confirmed, as well as the negligible influence of slab orientation and a 30%

reduction in required measuring equipment. The fire-resistance limit according to the load-bearing capacity criterion (239 minutes) is determined and supported by numerical analysis and literature data.

The **fifth chapter** develops a 9-step algorithm for assessing the fire-resistance limit of steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile, combining experimental and numerical methods. An improved implementation scheme using a small-scale fire furnace is presented, considering structural features of specimens and thermal conditions. Optimal fragment sizes, installation configuration, burner placement, and sealing requirements are justified. Residual load-bearing capacity after fire exposure is calculated, confirming the effectiveness of the approach. A list of mandatory experimental data for calculations is provided, and the use of Fisher’s F-criterion is recommended to verify result reliability.

Keywords: fire, safety, fire resistance, steel, reinforced concrete, slab, mathematical, computer, model, hazard, experiment, calculation, modelling, combustion processes, deformation, load-bearing capacity.

LIST OF PUBLICATIONS ON THE DISSERTATION TOPIC

Articles in Ukrainian Scientific Journals:

1. Stepanenko V. O. Investigation of the influence of the configuration of a small-scale fire furnace on the uniformity of heating the surface of a steel–reinforced concrete slab. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. No. 2 (18). Kyiv, 2024. pp. 4–12. <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/download/245/179>
2. Nuianzin O. M., Ivanenko O. I., Stepanenko V. O., Samchenko T. V. Investigation of fire temperature regimes in horizontal cable tunnels depending on their parameters and fire load. *Collected Scientific Papers “Emergencies: Prevention and Elimination.”* ChIPB named after Heroes of Chornobyl, NSUCD of Ukraine. Vol. 8. No. 1. Cherkasy, 2024. pp. 139–150. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/200/191>
3. Ivanenko O. O., Sidnei S. O., Rudesko I. V., Ishchenko I. I., Stepanenko V. O. Investigation of the influence of the finite element mesh on temperature

distribution in a ribbed slab under fire modeling. *Collected Scientific Papers “Emergencies: Prevention and Elimination.”* CHIPB named after Heroes of Chornobyl, NSUCD of Ukraine. Vol. 8. No. 2. Cherkasy, 2024. pp. 121–132. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/issue/view/16>

4. Stepanenko V. O., Nuianzin O. M., Peregin A. V., Kryshtal D. O., Kopytin D. E. Results of heating steel–reinforced concrete slabs with a corrugated profile under fire thermal exposure. *Collected Scientific Papers “Problems of Emergencies.”* NSUCD of Ukraine. No. 2 (40). Kharkiv, 2024. pp. 113–125. <http://pes.nuczu.edu.ua/uk/arkhiv-nomeriv/11-ua-cat/455-stepanenko-v-o-nuyanzin-o-m-peregin-a-v-krishtal-d-o-kopitin-d-e-rezultati-progrivu-stalezalizobetonnikh-plit-z-gofrovanim-profilem-pid-chas-teplovogo-vplivu-pozhezhi>

Publications in Journals Indexed in Scopus and/or WoS:

1. Palchykov R., Ballo Y., Nizhnyk V., Mykhailov V., Gavryliuk A., Loik V., Synelnikov O., Synelnikov S., Stepanenko V., Nuianzin O. Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 132, No. 10. pp. 37–45. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/317332>

2. Fedchenko S., Nuianzin O., Stepanenko V., Vedula S. Modeling the Thermal Effects of Fire on Steel-Reinforced Concrete Slabs with a Corrugated Profile. *Key Engineering Materials*. 2025. Vol. 1028. pp. 33–40. <https://www.scientific.net/KEM.1028.33>

Utility Model Patents:

1. Modular shelter protection system from vehicle collisions: pat. 160549 Ukraine. No. 202405340; appl. 12.11.2024; publ. 17.09.2025, Bull. No. 38. 120 p.

Conference Proceedings Confirming Dissertation Validation:

1. Nuianzin O. M., Stepanenko V. O., Kaidash V. S. Investigation of heating uniformity of reinforced concrete structural elements in a small-scale fire furnace. *“Emergencies: Safety and Protection” – Proc. of the XIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Cherkasy:

ChIPB named after Heroes of Chornobyl, NSUCD of Ukraine, 2023. pp. 59–60.
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21190>

2. Nuianzin O. M., Stepanenko V. O., Yanishevskiy V. E. Experimental study on heating a reinforced concrete slab in a small fire furnace. *“Theory and Practice of Fire Extinguishing and Emergency Elimination” – Proc. of the XV Int. Sci.-Pract. Conf.* Cherkasy: ChIPB named after Heroes of Chornobyl, NSUCD of Ukraine, 2024. pp. 186–187.
[http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22059/1/Nuianzin_2024_TPGPL NS_3_85.pdf](http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22059/1/Nuianzin_2024_TPGPL_NS_3_85.pdf)

3. Nuianzin O. M., Stepanenko V. O. Experimental study on heating a steel-reinforced concrete slab with a corrugated profile. *“Emergencies: Safety and Protection” – Proc. of the XIV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation.* Cherkasy: ChIPB named after Heroes of Chornobyl, NSUCD of Ukraine, 2024. pp. 138–139.
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21325>

4. Stepanenko V. O. Metrological evaluation of the quality of building materials for ensuring the safety of technogenic hazard facilities. *“Metrological Aspects of Decision-Making under Technogenic Hazards” – Proc. of the All-Ukrainian Scientific and Practical Online Conference for Students and Young Scientists.* Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Highway University, 2024. pp. 106–108. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22299>

5. Stepanenko V. O. Innovative building materials: a way to improve occupational safety. *“Topical Issues of Occupational Safety in the Context of Sustainable Development and European Integration of Ukraine” – Proc. of the V Int. Sci.-Pract. Online Conference.* Kharkiv: O. M. Beketov National University of Urban Economy, 2024. pp. 42–44. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22311>

6. Stepanenko V. O. Fire safety provision at facilities operating with hazardous chemical substances. *“Theory and Practice of Fire Extinguishing and Emergency Elimination” – Proc. of the XVI Int. Sci.-Pract. Conf.* Cherkasy: ChIPB named after Heroes of Chornobyl, NSUCD of Ukraine, 2025. pp. 351–352.
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25660>

7. Stepanenko V. O. Fire safety risk analysis in automotive transport. *“Scientific Spring” – Proc. of the XV Int. Sci.-Techn. Conf.* National Technical University "Dnipro Polytechnic", 2025. p. 52. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25703>
8. Stepanenko V. O. Analysis of the impact of climate change on the frequency of man-made accidents. *“Problems of Civil Protection and Life Safety: Modern Realities of Ukraine” – Proc. of the XI All-Ukrainian Distance Sci.-Pract. Conf.* Cherkasy: NSUCD of Ukraine, 2025. pp. 178–179. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25704>
9. Nuianzin O. M., Stepanenko V. O., Yanishevskyi V. E. Features of computer modeling of heating of a steel–reinforced concrete slab in a small fire furnace. *“Theory and Practice of Fire Extinguishing and Emergency Elimination” – Proc. of the XVI Int. Sci.-Pract. Conf.* Cherkasy: NSUCD of Ukraine, 2025. pp. 324–326. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25700>

ЗМІСТ

ВСТУП.....	27
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	41
1.1. Встановлення переваг та недоліків застосування сталезалізобетонних плит у будівництві	41
1.2. Особливості експериментального оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит	49
1.3. Особливості розрахункового оцінювання межі сталезалізобетонних плит.....	56
1.4. Мета і завдання дисертації	66
РОЗДІЛ 2 ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТАХ З ГОФРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ ТА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТЕМПЕРАТУРНИХ РОЗПОДІЛІВ.	67
2.1. Особливості комп'ютерного моделювання процесів тепломасообміну під час нагрівання сталезалізобетонних плит	67
2.2. Аналіз основних характеристик програмних комплексів обчислювальної газогідродинаміки.....	71
2.3. Особливості створення комп'ютерних моделей тепломасообміну у вогневих печах програмними комплексами CFD	77
2.4. Особливості моделювання теплового впливу пожежі на сталезалізобетонні плити з гофрованим профілем.....	88
2.5. Висновки до розділу 2	91
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ ФРАГМЕНТІВ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ У МАЛОГАБАРИТНІЙ ВОГНЕВІЙ ПЕЧІ.....	93

3.1. Передумови для розроблення експериментальної методики вогневих випробувань фрагментів сталезалізобетонних плит у малогабаритній вогневій печі	93
3.2. Виготовлення зразків для випробувань та зовнішні умови	95
3.3. Методика та засоби випробувань	98
3.4. Проведення випробувань та їхні результати	103
3.5. Висновок до розділу 3	109
РОЗДІЛ 4 ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНЬ РОЗРАХУНКУ З ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ З ГОФРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.	111
4.1. Відтворення експерименту з нагрівання сталезалізобетонної плити у програмному комплексі CFD	111
4.2. Дослідження впливу орієнтації у просторі сталезалізобетонної плити під час проведення експериментальної частини загального методу	118
4.3. Удосконалення розрахункової частини методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем	127
4.4. Результати використання удосконаленого методу	135
4.5. Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості плити	139
4.6. Висновки до розділу 4	140
РОЗДІЛ 5 АЛГОРИТМ ЗАСТОСУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ.....	142
5.1. Загальна схема удосконалень експериментально-розрахункової методики оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем.....	142
5.2. Особливості елементів експериментального обладнання	143
5.3. Умови виготовлення та підготовки фрагментів сталезалізобетонних конструкцій	146

5.4. Алгоритм проведення експерименту з нагрівання фрагменту сталезалізобетонної плити	148
5.5. Вимоги до отриманих результатів.....	150
5.6. Інтерполяція температурних розподілень всередині фрагменту сталезалізобетонної плити	151
5.7. Алгоритм розрахунку міцності плити на основі даних інтерполяції	153
5.8. Валідація результатів отриманих за удосконаленим експериментально-розрахунковим методом.....	154
5.9. Детальна схема проведення оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит за удосконаленим експериментально-розрахунковим методом.....	156
5.10. Висновки до розділу 5	159
ВИСНОВКИ	162
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	165
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	178
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації	182

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному будівництві набуло широкого поширення застосування сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, які поєднують в собі переваги сталевих та залізобетонних конструкцій. Однак, оцінювання їхньої вогнестійкості здебільшого здійснюється розрахунковими методами, що, з огляду на композитну природу таких плит та значну варіативність їх складу, часто не дає достовірних результатів. Це ускладнює забезпечення нормативного рівня пожежної безпеки об'єктів будівництва та ефективного реагування рятувальників в умовах надзвичайних ситуацій.

Особливої актуальності дана задача набуває в умовах обмеженого доступу до великогабаритних вогневих печей для експериментального оцінювання вогнестійкості конструкцій у різних регіонах України. Це зумовлює необхідність розробки методик, адаптованих до використання малогабаритних вогневих установок, які дозволяють проводити експериментальні дослідження без транспортування зразків на великі відстані.

Аналіз праць провідних дослідників у галузі вогнестійкості будівельних конструкцій, зокрема С. В. Поздєєва, О. М. Нуяззіна, П. Г. Круковського, В. В. Ніжника, В. Bartelemi, Т. Harmathy та ін., свідчить про значні досягнення у створенні підходів до визначення межі вогнестійкості залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій. Проте, використання відомих методик не забезпечує високу достовірність отриманих результатів, що пов'язано з анізотропністю процесів у залізобетоні та недосконалістю розрахунків за спрощеними методиками.

Таким чином, удосконалення методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем із застосуванням малогабаритних вогневих печей є актуальним науковим завданням, що сприятиме підвищенню достовірності оцінки вогнестійкості та, як наслідок, надійності таких конструкцій.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами та темами.

Дисертацію виконано відповідно до Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011–2015 роки (розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 № 2348-р), згідно з «Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами», що ратифікована на підставі Закону України № 1678-VII від 16.09.2014; «Стратегією розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року», затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 22.09.2021 № 1145-р. Дисертаційне дослідження є складником технічного завдання науково-дослідної роботи в ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Удосконалення експериментально-розрахункової бази оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій при випробуваннях їхніх малогабаритних фрагментів» («Удосконалення оцінювання – вогнестійкість»), державний реєстраційний номер НДР – 0123U101399, де здобувач була виконавцем.

Ідея роботи полягає в розробці удосконалень для розрахунково-експериментального методу оцінки межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит, що не знижуючи точності та надійності підвищить екологічність, економічність та знизить трудомісткість у порівнянні з повномасштабними випробуваннями на вогнестійкість та буде більш достовірним за існуючі експериментально-розрахункові та розрахункові методики з метою гарантування нормативної стійкості конструкцій у разі пожежі. Це можливо досягнути завдяки проведенню нагрівання малогабаритних фрагментів без застосування механічного навантаження (з урахуванням особливостей одностороннього теплового впливу та раціонального розміщення точок замірювання температури всередині зразків) та врахування реальних геометричних параметрів конструкцій під час подальших розрахунків температурних полів і несучої здатності повномірних конструкцій.

Об'єкт дослідження – процеси нагрівання та деформації елементів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем у ході оцінювання їхньої вогнестійкості.

Предметом дослідження – експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем на основі нагрівання фрагментів у малогабаритних вогневих печах.

Мета – виявлення закономірностей нагрівання та втрати міцності сталезалізобетонними плитами з гофрованим профілем за умов пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення експериментально-розрахункового методу такої оцінки.

Для досягнення поставленої мети були сформовані завдання:

1. Проаналізувати сучасні методи експериментального та розрахункового оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит, виявити їхні переваги та обмеження, визначити науково-практичні передумови до розроблення удосконаленої методики оцінювання вогнестійкості.
2. Створити комп'ютерні моделі процесів тепломасообміну у сталезалізобетонних плитах з гофрованим профілем під впливом пожежі та описати алгоритм побудови моделей теплового впливу на конструкції у вогневих печах засобами CFD-програмних комплексів.
3. Розробити методику та провести експериментальні дослідження з нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит у малогабаритній вогневій печі за стандартним температурним режимом пожежі, а також систематизувати результати температурних вимірювань у контрольних точках.
4. Обґрунтувати розрахункову частину методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем шляхом створення розрахункового алгоритму визначення температурних полів усередині конструкції на основі точкових температурних вимірювань, отриманих під час експерименту.
5. Розробити алгоритм інтегрування експериментальних та розрахункових даних у метод оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем та обґрунтувати подальший розрахунок її несучої

здатності з урахуванням фактичних геометричних розмірів, просторової орієнтації й прикладеного навантаження.

Наукова новизна дисертації полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання щодо підвищення ефективності процесу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем шляхом наукового обґрунтування удосконалення експериментально-розрахункового методу її визначення. Запропоновано підхід, який враховує специфіку передачі тепла у багатошарових матеріалах та можливість застосування малогабаритних вогневих установок для локального нагрівання фрагментів без необхідності масштабних випробувань, що є особливо актуальним у контексті післявоєнної відбудови та економії ресурсів.

Отримані такі основні наукові результати:

Уперше:

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що у діапазоні ребер сталевго профілю до 52 мм під час нагрівання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем за стандартним температурним режимом пожежі рівномірність прогріву арматури не залежить від глибини та кроку гофрованої частини;

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що положення сталезалізобетонної плити (горизонтальне чи вертикальне) під час теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі у малогабаритній вогневій печі не впливає на рівномірність температурного поля по поверхні гофрованого сталевго профілю, а також на результати теплотехнічних випробувань загалом, що підтверджено максимальним відхиленням, яке не перевищує 5 %.

Удосконалено:

- експериментально-розрахунковий метод оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із гофрованим профілем, що відрізняється від існуючих врахуванням особливості теплопередачі у сталевому профілі та залізобетоні під час впливу температурного режиму пожежі, а також геометрії

поверхні гофрованого профілю, передачі тепла у композитних матеріалах, що можливо здійснити за рахунок застосування малогабаритних вогневих установок для нагрівання фрагментів – без необхідності повномасштабних випробувань – із подальшою екстраполяцією результатів на реальні розміри навантажених конструкцій за допомогою обчислень;

– підхід до моделювання температурного поля в поперечному перерізі сталезалізобетонної плити при тепловому впливі, без зниження точності отриманих результатів, шляхом застосування методу інтерполяції експериментальних даних, що у порівнянні з традиційними методиками дозволяє зменшити кількість необхідних місць контролю температури до 9 у будівельній конструкції та 2 у камері печі, одночасно враховуючи геометричні особливості профілю плити та параметри армування;

– конструкцію малогабаритної вогневої установки шляхом введення додаткових конструктивних елементів контролю температурного режиму та енергоефективності, що дозволило підвищити якість процесу нагрівання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, сприяло більшій екологічності, економічності та зниженню трудомісткості проведення випробувань.

Набуло подальшого розвитку застосування експериментально-розрахункових методів оцінки межі вогнестійкості для вирішення задач із оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, що ураховує просторову структуру гофрованої основи профілю та дозволяє підвищити точність і достовірність визначення межі вогнестійкості таких будівельних конструкцій.

Обґрунтованість, достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджені результатами аналізу актуальних наукових публікацій та вимог нормативних документів з оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит; відповідністю розроблених методів дослідження поставленій меті і завданням; адекватністю та достовірністю отриманих результатів експериментальних досліджень; удосконаленням експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з

гофрованим профілем відповідно до вимог чинних національних стандартів; апробацією та застосуванням на практиці впроваджених результатів досліджень.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження проведено на основі систем диференціальних рівнянь неперервних середовищ типу рівнянь Нав'є – Стокса, рівнянь теплопровідності та напружено-деформованого стану залізобетону в умовах нагріву під час пожежі й рівнянь теплопровідності Фур'є. Для розв'язку рівнянь у роботі використано метод кінцевих або граничних елементів, оптимізаційні методи, а також методи статистичного оброблення експериментальних і розрахункових даних. Експериментальні дослідження виконано за допомогою малогабаритної вогневої установки.

Практичне значення. Полягає у розробленні ефективної експериментально-розрахункової методики оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, яка дозволяє зменшити обсяги повномасштабних вогневих випробувань за рахунок використання малогабаритних вогневих установок без втрати точності оцінювання; адаптувати метод до різних типів плит у діапазоні ребер сталевих профілів до 52 мм з урахуванням реального армування, геометрії та умов теплового навантаження; підвищити точність розрахунку температурних полів та міцності елементів конструкції під час дії пожежі; інтегрувати запропоновану методику у практику інженерних розрахунків з використанням ПЗ Mathcad та ANSYS, що сприяє автоматизації процесу визначення межі вогнестійкості; удосконалити нормативно-технічну базу щодо випробувань та проектування залізобетонних конструкцій на вогнестійкість.

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

– Система захисту модульних укриттів від зіткнень з автотранспортом: пат. 160549 Україна. № 202405340; заявл. 12.11.2024; опубл. 17.09.2025, Бюл. № 38. 120 с.

Результати дослідження впроваджено в:

– діяльність ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича компанія «Спецзахист» – розроблені й запропоновано новації мають цінність для процесу проведення та оцінки на вогнестійкість сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, що застосовують, зокрема, під час будівництва об'єктів критичної інфраструктури та захисних споруд цивільного захисту (акт упровадження від 30.09.2025);

– у роботу 3 Спеціалізованого центру швидкого реагування ДСНС України за рахунок розробки алгоритму застосування удосконаленої експериментально-розрахункової методики, включаючи підготовку зразків, проведення випробувань, обробку даних інтерполяції, розрахунок міцності та валідацію точності результатів на основі порівняння з науковими джерелами та експериментальними даними (акт упровадження від 02.10.2025);

– в освітній процес Національного університету цивільного захисту України, що підтверджує актуалізований характер освіти та високий науково-методичний рівень викладання дисциплін, оптимізує якість лекційних і практичних занять для здобувачів вищої освіти (акт упровадження від 14.10.2025).

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у виконанні аналізу наукових публікацій, нормативної документації та методичних підходів до оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій; у розробленні методики вогневих випробувань малогабаритних фрагментів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем без механічного навантаження; у моделюванні температурного поля в перерізі конструкції під впливом стандартного температурного режиму пожежі з урахуванням одностороннього нагрівання; у визначенні та обґрунтуванні раціонального розташування точок вимірювання температури у внутрішніх шарах плит; у виконанні вогневих експериментальних досліджень фрагментів плит у малогабаритній вогневій печі; в інтерпретації отриманих температурних даних, побудові температурних розподілів у поперечному перерізі плити; у розробленні алгоритму оцінювання несучої здатності елементів сталезалізобетонних плит після пожежного впливу; а також у

формуванні удосконаленого експериментально-розрахункового методу оцінювання межі їх вогнестійкості. Також особистий внесок здобувача висвітлений в наукових публікаціях, виконаних у співавторстві, які відповідають тематиці дисертації:

- у науковій праці «Дослідження температурних режимів пожежі у горизонтальних кабельних тунелях в залежності від їхніх параметрів та пожежного навантаження» здобувачем було створено комп'ютерні моделі тепломасопереносу під час пожежі у кабельному тунелі та проаналізовано результати обчислювального експерименту. Нуянзін О. М. розробив план обчислювального експерименту та працював над висновками. Іваненко О. І. провів аналіз літературних джерел та сформулював мету. Самченко Т. В. працював над формулюванням загальної частини проблеми та оформленням результатів [2].

- у науковій праці «Дослідження температурних режимів пожежі у горизонтальних кабельних тунелях в залежності від їхніх параметрів та пожежного навантаження» здобувачем було створено параметризовані геометричні моделі фрагмента ребристої плити, згенеровано три типи скінченно-елементних сіток (автоматична, MultiZone, Body Sizing), виконано теплотехнічне моделювання в середовищі ANSYS WB та проведено аналіз температурних полів бетону й арматури. Сідней С. О. розробив методологічну основу дослідження, обґрунтував вибір типів скінченно-елементних моделей та здійснив оцінювання фізичної коректності отриманих результатів. Рудешко І. В. провела аналіз науково-технічної літератури, сформулювала постановку проблеми, визначила актуальність дослідження та взяла участь у підготовці розділу «Аналіз літературних даних». Іщенко І. І. відповідав за обґрунтування теплофізичних характеристик матеріалів, що залежать від температури, а також здійснив порівняльний аналіз розподілу температур для різних типів скінченно-елементних сіток. Іваненко О. О. підготував інтерпретацію результатів, сформував висновки дослідження та виконав остаточне редагування тексту статті відповідно до вимог наукового видання. [3].

- у науковій праці «Результати прогріву сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем під час теплового впливу пожежі» здобувачем було організовано та проведено первинну підготовку даних експериментів, здійснено

узагальнення отриманих результатів та сформульовано основні висновки дослідження. Нуянзін О. М. розробив методику експериментальних досліджень, очолив процес планування випробувань у малогабаритній вогневій печі, забезпечив наукове керівництво проведенням експериментів та здійснив аналіз адекватності отриманих даних. Перегін А. В. проводила технічну підготовку малогабаритної вогневої печі, здійснив моніторинг температурного режиму, відповідав за встановлення датчиків контролю температури та збір експериментальних вимірювань. Кришталь Д. О. провів аналіз літературних джерел, сформулював наукову проблему, обґрунтував актуальність дослідження та здійснив опис нормативних вимог щодо вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій. Копитін Д. Е. брав участь у виготовленні фрагментів сталезалізобетонних плит із гофрованим профілем, контролював умови їх зберігання, здійснював фото- та відеофіксацію випробувань, а також опрацював первинні експериментальні дані [4].

- у публікації «Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures» здобувачем було виконано математичне моделювання процесів тепломасообміну під час пожежі на трансформаторах, розташованих у захисних спорудах, із використанням програмного комплексу FDS. Проаналізовано результати обчислювальних експериментів, здійснено статистичну обробку даних, а також підготовлено узагальнення для обґрунтування модифікованого температурного режиму пожежі. Нуянзін О. М. розробив план обчислювального експерименту, визначив вихідні умови для сценаріїв розповсюдження пожежі та здійснив наукове редагування висновків. Балло Я. виконав аналітичний огляд сучасних методів оцінювання температурних режимів пожежі, узагальнив результати попередніх досліджень та брав участь у формуванні наукової новизни роботи. Нижник В. забезпечив методичне керівництво щодо застосування гідрокарбонового та номінального температурних режимів, а також надав фахові консультації щодо використання CFD-моделювання для оцінювання впливу температури на конструкції. Михайлов В. опрацював педагогічні та методологічні аспекти структури дослідження, сприяв формуванню логічної побудови розділів та систематизації матеріалу. Гаврилук А.

здійснив аналіз нормативних документів (DSTU, Eurocode), необхідних для визначення критеріїв вогнестійкості огорожувальних конструкцій, та долучився до формування методів розрахунку. Лоїк В. працював над розділом, присвяченим моделюванню впливу температури на несучі конструкції, та брав участь у розробці методики обґрунтування критичних температур. Синельников О. виконав опрацювання вихідних даних про трансформаторне обладнання, визначив параметри горючого навантаження та умови можливого розливу оливи. Синельников С. провів верифікацію моделей CFD, перевірку якості сітки, аналіз коректності отриманих температурних полів і долучився до візуалізації результатів [5].

- у публікації «Modeling the Thermal Effects of Fire on Steel-Reinforced Concrete Slabs with a Corrugated Profile» здобувачем було виконано математичне моделювання процесів теплопереносу в сталезалізобетонних плитах із гофрованим профілем за умов стандартного та параметричного температурних впливів. Застосовано чисельні методи та програмні засоби (FDS та власні інженерні скрипти) для розрахунку температурних полів у бетоні та сталевій арматурі, здійснено аналіз нелінійної теплопровідності та проведено статистичну обробку результатів. Здобувач здійснив інтерпретацію отриманих даних, сформував висновки щодо поведінки композитної плити під дією пожежі та підготував остаточний варіант статті. Нуязін О. М. розробив концепцію дослідження, визначив вихідні дані для сценаріїв розвитку пожежі, забезпечив постановку задачі для моделювання та здійснив наукове редагування матеріалів. Федченко С. М. виконала аналітичний огляд сучасних конструктивних рішень сталезалізобетонних плит, визначив механізми теплової взаємодії між сталевим профілем та бетонним шаром, а також узагальнила результати попередніх досліджень. Ведула С. А. брав участь у формуванні структури розділів статті й обґрунтуванні актуальності роботи [6].

- у корисній моделі «Система захисту модульних укриттів від зіткнень з автотранспортом» здобувачем було опрацьовано технічну концепцію побудови системи захисту, виконано аналіз можливих варіантів конструктивного

розташування залізобетонних плит та болардів, визначено оптимальну конфігурацію їх розміщення навколо модульного укриття, а також підготовлено первинні розрахункові параметри елементів системи. Кархут І. І. здійснив загальне наукове керівництво розробкою, визначив технічну проблему, сформував методичні підходи до створення конструкції та брав участь у формулюванні технічного результату, закладеного в корисній моделі. Новгородченко А. Ю. виконала аналіз існуючих конструкційних рішень і найближчих аналогів, зокрема засобів огороження та ударозахисних систем, а також працювала над обґрунтуванням вибору матеріалів і технічних параметрів болардів та анкерних систем. Некора О. В. брала участь у розробленні структурної схеми системи захисту, опрацьовувала варіанти взаємодії анкерних елементів і закладних деталей, а також долучилася до підготовки опису роботи конструкції та її функціональних можливостей. Ніжник В. В. виконав технічні проробки щодо встановлення залізобетонних плит на ґрунт без фундаментних конструкцій, проаналізував умови сприйняття навантажень від удару транспортного засобу та надав пропозиції щодо раціональних розмірів і розміщення плит. Новгородченко В. В. працював над формулюванням технічної задачі, уточненням формули корисної моделі, а також над підготовкою графічних матеріалів (фігур) до опису [7].

- у наукових тезах «Дослідження рівномірності прогріву елементів залізобетонних будівельних конструкцій у малогабаритній вогневій установці» здобувачем було виконано комп'ютерне моделювання роботи запроєктованої малогабаритної вогневої установки, проаналізовано результати обчислювального експерименту та здійснено візуалізацію температурних полів нагрівання елементів конструкцій. Нуянзін О. М. розробив план обчислювального експерименту, визначив параметри вогневої установки, забезпечив наукове керівництво та працював над формулюванням висновків. Кайдаш В. В. провів аналіз літературних джерел, обґрунтував актуальність створення малогабаритної вогневої установки та працював над формулюванням загальної частини проблеми та структури дослідження [8].

- у наукових тезах «Експериментальні дослідження з нагрівання залізобетонної плити у малогабаритній вогневій печі» здобувачем було проведено комп'ютерне моделювання процесу нагрівання залізобетонної плити, здійснено аналіз отриманих температурних кривих, а також виконано первинне узагальнення результатів експериментального прогріву. Нуянзін О. М. розробив план експериментальних досліджень, визначив параметри проведення вогневих випробувань, здійснив наукове керівництво формуванням методики та працював над формулюванням висновків. Янішевський В. провів аналіз літературних джерел, сформулював мету та завдання дослідження, а також працював над описом загальної частини проблеми та оформленням результатів експерименту [9].

-у наукових тезах «Експериментальне дослідження з нагрівання сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем» здобувачем було виконано комп'ютерне моделювання теплових процесів під час нагрівання сталезалізобетонної плити, здійснено аналіз температурних кривих, отриманих у ході експериментів, а також проведено узагальнення результатів та їх порівняння з даними, наведеними в літературі. Нуянзін О. М. розробив план експериментальних досліджень, визначив конфігурацію малогабаритної вогневої печі, забезпечив наукове керівництво проведенням випробувань, а також працював над формулюванням висновків та перевіркою адекватності експериментальних даних [10].

- у наукових тезах «Особливості створення комп'ютерної моделі нагрівання сталезалізобетонної плити у малогабаритній вогневій печі» здобувачем було виконано побудову геометричних моделей вогневої печі та сталезалізобетонної плити у CAD-середовищі, проведено імпорт 3D-моделі до CFD-програмного комплексу, створено розрахункову сітку, а також виконано аналіз особливостей тепломасообміну з урахуванням зон інтенсивних турбулентних потоків та теплопередачі у твердому тілі. Нуянзін О. М. здійснив загальне наукове керівництво роботою, визначив методологічні підходи до моделювання тепломасопереносу, обґрунтував вибір математичного апарату (рівняння Нав'є–Стокса, рівняння теплопровідності, моделі турбулентності) та брав участь у

формуванні висновків. Янішевський В. виконав аналіз сучасних методик випробувань будівельних конструкцій, сформулював наукову проблему та мету дослідження, а також працював над описом фізичних процесів у камері вогневої печі й оформленням текстової частини роботи [16].

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

- XIII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, НУЦЗ України, 2023 р.);
- XV Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, НУЦЗ України, 2024 р.);
- Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах» (м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2024 р.);
- V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Актуальні питання безпеки праці у контексті сталого розвитку та європейської інтеграції України» (м. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, 2024 р.);
- Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах» (м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожнього університету, 2024 р.);
- XVI Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, НУЦЗ України, 2025р.);
- XV Міжнародна науково-технічна конференція «Наукова весна» (НТУ «Дніпровська політехніка», 2025);

- XI Всеукраїнська заочна науково-практична конференція «Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України»(м. Черкаси, НУЦЗ України, 2025 р.).

Публікації. Результати досліджень, які висвітлено у дисертації, опубліковано в 16 наукових працях: 4 статті у наукових фахових періодичних виданнях України, 2 публікації, що індексуються в наукометричній базі Scopus, 1 патент на корисну модель та 9 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 186 сторінок, з них основного тексту 162 сторінки, 9 таблиць, 44 рисунки, список використаних джерел містить 105 найменувань та займає 13 сторінок, а також 2 додатка на 9 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Встановлення переваг та недоліків застосування сталезалізобетонних плит у будівництві

Сталезалізобетонні конструкції у світовій будівельній практиці відносяться до стандартних інженерних рішень. Вони поєднують низку переваг, серед яких – висока швидкість зведення та зменшення ресурсоємності, що суттєво підвищує економічну ефективність у багатьох сегментах будівництва.

Для багатьох країн саме застосування сталезалізобетонних конструкцій, зокрема забезпечення спільної роботи сталевих балок із плитами та використання монолітних перекриттів по профільованих настилах, стало поштовхом до широкого впровадження сталевих конструкцій у багатоповерховому комерційному будівництві. На рис. 1 представлено приклад такої конструкції [17].

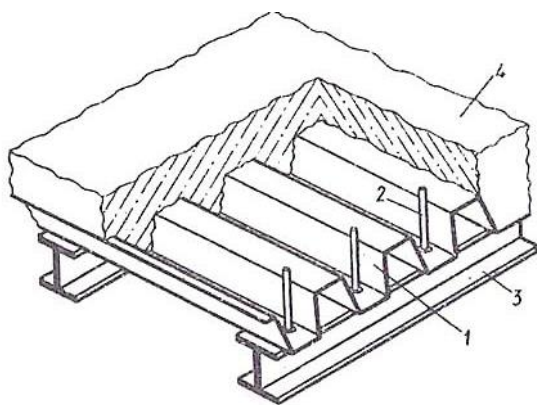


Рисунок 1.1. Плити з настилами та опалубкою з оцинкованих трапецеїдальних профільованих настилів без виштамповок: 1 – профільований настил; 2 – анкерний упор; 3 – сталева балка; 4 – бетонна плита.

У порівнянні з такими ринками, Україна суттєво відстає у впровадженні сталезалізобетонних конструкцій у стандартну практику проектування. Вітчизняне застосування таких рішень здебільшого обмежується мостовими спорудами, деякими унікальними об'єктами та окремими прикладами. Це значною мірою зумовлено традиціями вітчизняної проєктної школи [18]. Основним завданням цього посібника є формування у проєктувальників глибшого розуміння переваг використання сталезалізобетонних конструкцій, методик їх розрахунку та принципів грамотного конструювання.

Практика використання сталезалізобетонних конструкцій у різних країнах світу визначила перекриття, що складаються з плит по сталевих настилах і сталезалізобетонних балок, як найбільш раціональне та поширене конструктивне рішення [19].

На будівельних ринках Західної Європи, США, а також розвинених країн Близького Сходу та Азії, ці конструкції стали ефективним інструментом, що дозволив суттєво підвищити ефективність зведення будівель і конкурентоспроможність металевих каркасів [20].

Сталезалізобетонні перекриття рекомендується використовувати в конструкціях усіх типів будівель на основі варіантного проектування та порівняльного аналізу витрат. Такі перекриття мають нижчу вартість життєвого циклу та є більш екологічними як на етапі виробництва, так і при демонтажі, порівняно з традиційними рішеннями в монолітному залізобетоні [21].

Використання сталезалізобетонних перекриттів має численні переваги, перелік яких подано нижче [18-21].

1. Висока швидкість будівництва. Більшість сталезалізобетонних конструкцій будівель складаються зі збірної металевої основи (колон, балок, настилів), яка одночасно виконує функції каркаса, армування та незнімної опалубки для вкладання бетону. Це дозволяє відмовитись від складних опалубних робіт завдяки застосуванню профнастилу як незнімної опалубки, забезпечити жорстке ребристе перекриття, спростити улаштування прорізів та обрати найпростіші схеми балкових клітин.

2. Зниження матеріаломісткості каркаса. Сталезалізобетонні перекриття підвищують несучу здатність і жорсткість конструкції за рахунок спільної роботи металевих і бетонних елементів. Це забезпечує ефективний розподіл зусиль у перерізах і покращує розрахункові характеристики. Як наслідок – знижується металоємність, зменшуються розміри перерізів і загальна будівельна висота перекриттів. Композитна робота дає змогу знизити металоємність типових довгопрольотних перекриттів до 20%. Застосування монолітних плит по сталевих профнастилах забезпечує ефективне ребристе перекриття замість плоского. Наведена товщина плит по настилах заввишки до 85 мм становить ≈ 100 мм, тоді як для плоских плит – 120–150 мм. Загальне зменшення маси сталезалізобетонного перекриття може досягати 30–50% у порівнянні з традиційними залізобетонними рішеннями [23].

3. Великі прольоти при невеликих габаритах. Завдяки підвищеній жорсткості та несучій здатності балок перекриттів можливо зменшити їхні габарити порівняно з аналогічними конструкціями без композитної дії. Це дозволяє: зменшити висоту поверхів і площу фасадів; збільшити простір для інженерних комунікацій; підвищити поверховість при тій самій загальній висоті будівлі; зменшити будівельний об'єм та експлуатаційні витрати [24].

4. Стійкість каркаса. При наявності достатнього анкерування, сталезалізобетонні перекриття утворюють горизонтальні жорсткі диски, які забезпечують часткове або повне розкріплення балкової клітки в площині перекриття. Це дає змогу ефективніше використовувати балки, виключаючи перевірки на загальну втрату стійкості. Сталезалізобетонна плита може замінити горизонтальні в'язі. За певних умов повна або часткова відмова від в'язів зменшує металоємність на 3–7% і знижує трудомісткість монтажу. Жорсткі диски також сприяють рівномірному розподілу горизонтальних навантажень і можуть у кілька разів підвищити горизонтальну жорсткість конструкції. На стадії монтажу подібний, хоча й менший, ефект може забезпечувати сталевий профнастил, належно закріплений до балок.

5. Підвищена вогнестійкість. Завдяки бетонуванню частини металевих елементів, бетон виступає природним вогнезахистом. Це зменшує нагріваємий периметр профілів. Згідно з ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [16], сталеві балки з бетонною плитою мають підвищену вогнестійкість: коефіцієнти 0,7 – для незахищених і 0,85 – для захищених. У знижених перекриттях, як правило, лише нижня полиця балки залишається незахищеною, що мінімізує площу вогнезахисного покриття.

6. Зниження транспортних витрат. Завдяки компактності сталевих конструкцій зменшуються витрати на логістику. Високе співвідношення «міцність– вага» сталі забезпечує меншу масу й об'єм матеріалів для транспортування. Скорочуються обсяги робіт з опалубки та її переміщення, оскільки вона замінюється профнастилом. Наприклад, понад 1500 м² профнастилу можна доставити однією вантажівкою. Транспортні витрати на сталеві каркаси в 10–12 разів нижчі, ніж для збірного залізобетону.

7. Екологічність, повторне використання та реконструкція. Сталь – технологічний і перероблюваний матеріал: до 98% її елементів можна повторно використовувати або переплавити. Зварні та болтові з'єднання полегшують підсилення, реконструкцію й розширення об'єктів. Україна є одним із провідних світових виробників сталі, тож максимальне використання локальних матеріалів відповідає принципам сталого розвитку та циркулярної економіки.

Відповідно до даних [17], отримано наступні результати:

1. Зниження металоємності балочної клітки – 56,2%.
2. Зниження металоємності перекриття з урахуванням профнастилу – 37,8%.
3. Зниження питомої вартості перекриття – 13%.
4. Зменшення висоти перекриття – 38,9%.
5. Зменшення кількості елементів балочної клітки – 66,7%.
6. Зменшення площі нанесення вогнезахисних покриттів (при необхідності) – 67,5%.

У табл. 1.1. наведено порівняння класичного сталевого і сталезалізобетонного перекриттів.

Таблиця 1.1.

Приклад порівняння класичного сталевого і сталезалізобетонного перекриттів

Параметр	Варіант 1	Варіант 2
Загальний опис	Без застосування інструментів оптимізації, сталь S235	Інструменти оптимізації: • застосовані сталі підвищеної міцності S355; • балки сталезалізобетонні зі стад-болтами; • плити перекриттів по профнастилу з прольотом 5 м; • будівельний підйом у балках – 100 мм; • зварні монозсічення двотаври; • використання тимчасових в'язей
Розміри балкової клітки	17 м × 5 м	17 м × 5 м
Переріз головної балки	Верхній пояс – 280×20 мм Нижній пояс – 280×20 мм Стійка – 960×14 мм	Верхній пояс – 180×20 мм Нижній пояс – 230×20 мм Стійка – 560×12 мм
Висота головної балки	1000 мм	600 мм
Загальна висота перекриття	1130 мм	690 мм
Вага 1 м.п. головної балки	193,4 кг	99,3 кг
Вага 1 м.п. другорядної балки	32,9 кг	22,3 кг
Конструктивний коефіцієнт	1,1	1,1
Питома металоємність балочної клітки	53,19 кг/м ²	23,29 кг/м ²
Вага профнастилу	10 кг/м ²	16 кг/м ²
Питома металоємність перекриття (з урахуванням профнастилу)	63,19 кг/м ²	39,29 кг/м ²
Питома вартість перекриття	107,83 у.о./м ²	93,75 у.о./м ²

Ключові особливості рішення плити з настилами з оцинкованого трапецеїдального профільованого настилу без виштамповок («рифів») полягають у наступному [17]:

1. Настили з високим профілем зазвичай не потребують підпірки під час бетонування та спираються на сталеві балки за однопрогоною або багатопролітною схемою.

2. Гнучкі упори мають бути приварені до верхніх поясів сталевих балок безпосередньо на монтажному майданчику – виключно в гофрах трапецеїдального профілю. Це обмежує їх кількість, а отже, і несучу здатність сталезалізобетонних балок.

3. Альтернативно, гнучкі упори можуть бути приварені на заводі-виробнику сталевих конструкцій. У цьому випадку профільований настил повинен мати заздалегідь виконані отвори під упори, що створює труднощі у точному суміщенні елементів на будівельному майданчику.

4. На зсув працює лише частина залізобетонної плити – в межах гофрів опалубки, де встановлені упори. Це знижує загальну несучу здатність сталезалізобетонних балок.

5. Потрібне посилене армування: кожен гофр необхідно армувати поздовжніми стрижнями, а простір над гофрами – арматурними сітками, які повинні працювати як у прольоті, так і на опорах (у разі нерозрізної схеми).

6. Під час монтажного приварювання гнучких упорів можливе пошкодження захисного оцинкованого шару профілю, що може спричинити корозію в нижній частині настилу під впливом вологи, води після вологого прибирання або агресивного середовища.

7. Для штампованих упорів (наприклад, Hilti), які кріпляться на монтажі до верхніх поясів балок за допомогою дюбель-піроцвяхів або болтів, несуча здатність балок обмежена через невелику кількість кріплень, які можна розмістити в гофрі. До того ж, ці дюбелі мають нижчу несучу здатність, ніж стаболти типу NELSON, і не підходять для перекриттів із динамічним навантаженням.

8. Перед бетонуванням плити необхідно перевірити стійкість сталевих балок і, за потреби, встановити додаткові горизонтальні в'язі для забезпечення стабільності верхніх поясів балок у період бетонування.

Профілі укладаються на верхні пояси балок і працюють за нерозрізною схемою. До профілів із виштамповками належать, зокрема, Cofra G65, Cofra Plus, Cofra 40, Cofra 70, Haircol H тощо. В Україні профілі з рифленням випускає лише компанія ТПК – це профлисти типу ТП-85 з висотою профілю 85 мм.

Рішення з рифами мають подібні характеристики до профілів типу E150, E160 від ThyssenKrupp або Salzgitter. Проліт (крок балок) у таких конструкціях зазвичай обмежується розміром чарунки $3 \times 3,5$ м через знижену несучу здатність під час бетонування.

Завдяки наявності рифів різних типів, профілі під час експлуатації забезпечують надійне зчеплення із залізобетоном, запобігаючи відшаруванню та утворюючи монолітну сталезалізобетонну плиту. Це дозволяє зменшити обсяг необхідного армування. Однак континуальне (безперервне) армування таких плит унеможлиблює їх застосування за наявності вимог до вогнестійкості [17].

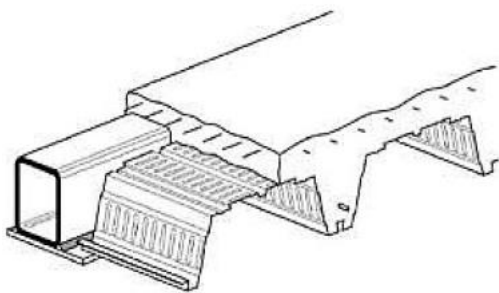


Рисунок 1.2. «Незнімна опалубка» з оцинкованих трапецеїдальних профілів з виштамповками («рифами»).

Навантаження на настил зазвичай передбачаються таким чином, щоб у процесі будівництва не виникала потреба в його тимчасовому підкріпленні.

Сталеві профільовані листи також можуть виконувати функцію горизонтальних діафрагм жорсткості та додатково підсилювати конструкцію на стадії монтажу. Для цього необхідно здійснити окремий конструктивний аналіз.

Маса профільованих листів залежить від їхньої товщини та форми гофрів.

Відповідно до вимог [24], еквівалентне навантаження від тимчасового робочого процесу розраховується на площу 3×3 м із навантаженням $1,5 \text{ кН/м}^2$, а для решти поверхні – $0,75 \text{ кН/м}^2$. У випадку, якщо плита має проліт 3 метри або менше, вона вважається повністю завантаженою навантаженням $1,5 \text{ кН/м}^2$ (рис. 1.3).

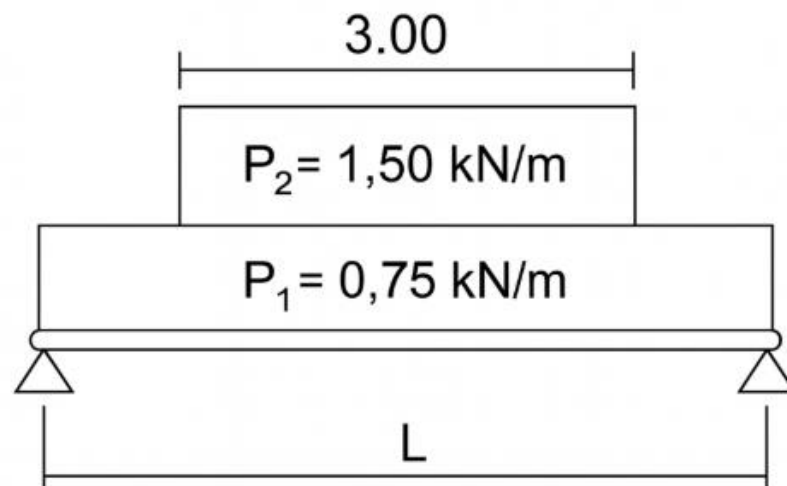


Рисунок 1.3. Загальна розрахункова схема плити: P_1 – постійне (власне) навантаження; P_2 – тимчасове (розрахункове) навантаження.

Слід враховувати, що у разі пожежі сталевий профільований лист втрачає несучу здатність через нагрівання та фактично виключається з роботи конструкції. Тому бетонна плита повинна бути самодостатньо армована для сприйняття всіх розрахункових навантажень [24].

У розрахунках може також враховуватись захисна дія сталевого листа на стадії нагріву ребра: під час його відшарування утворюється повітряний прошарок, який частково знижує інтенсивність теплопередачі [25].

Часто, збірні та монолітні сталезалізобетонні плити можуть спирати на двотаврові сталеві балки. На рис. 1.4. показана схему застосування такого підходу [24].

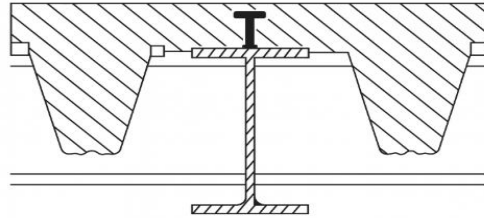


Рисунок 1.4. Загальна схема типового кріплення до опорного столика.

Важливим моментом є те, що на етапі зведення профнастил має витримувати всі монтажні навантаження без підкріплення його в прольоті.

За нормальних умов експлуатації (тобто без впливу високих температур або пожежі) вважається, що здатність плит до згину забезпечується як профільованим листом, так і залізобетонною ребристою частиною, причому їхні несучі здатності підсумовуються. Такий підхід до проєктування підтверджено Німецьким інститутом будівельної техніки (DIBt) на основі випробувань і експериментальних досліджень.

У цьому випадку передбачається повне використання несучої здатності профілю, тоді як залізобетонна частина проєктується для сприйняття залишкових зусиль згинального моменту. У зонах, прилеглих до опор, усі навантаження сприймаються саме профільованим листом. Таким чином, опір зусиллям зсуву в цих ділянках забезпечується за рахунок профлиста та спеціальних опорних елементів [24].

1.2. Особливості експериментального оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит

Ще 10 років тому всьому світі вогнестійкість залізобетонних конструкцій оцінюється переважно шляхом проведення вогневих випробувань [25–28]. Цей

метод вважали найнадійнішим завдяки високій точності, повторюваності результатів та їхній наочності.

Проте роботи [23, 29] доводять, що методи випробувань у великогабаритних вогневих печах є не виправдано неефективними. Їхні результати викликають не менше сумнівів, ніж розрахункові дані. Межа вогнестійкості конструкції визначається як проміжок часу від початку теплового впливу до моменту, коли несуча здатність стає недостатньою для сприйняття передбаченого навантаження.

В той же час для проведення натурних випробувань застосовується реальний будівельний об'єкт, зведений відповідно до проєктної документації. Такі експерименти є надійнішими відповідно до робіт [29]. Натомість величезним недоліком є величезна вартість та трудомісткість, часто, неекологічність.

У випадках, коли випробування повноцінного об'єкта неможливе з технічних чи економічних причин, допускається використання його фрагмента [23]. Такий підхід є доцільним у ситуаціях, коли лабораторні випробування не дозволяють однозначно визначити ступінь вогнестійкості конструкції.

Основним методом оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій залишається випробування за стандартним температурним режимом (1.1), яке проводять у спеціалізованих вогневих печах. Суть методу – у вимірюванні часу до досягнення конструкцією одного з нормативних граничних станів в умовах, встановлених відповідними стандартами [23].

«Стандартний» температурний режим пожежі представлений у вигляді залежності температури середовища від часу:

$$T_f^{st}(\tau) = 345 \lg(8t + 1) + T_0 \quad (1.1),$$

де t – час стандартного вогневого випробування, хв.; T_0 – початкова температура середовища, $^{\circ}\text{C}$; $T_0 \approx 20^{\circ}\text{C}$; $T_f^{st}(\tau)$ – температура у вогневій камері установки для визначення меж вогнестійкості конструкцій залежно від часу τ стандартного випробування.

Допустимі значення середньої температури в печі не повинні перевищувати $\pm 15\%$ для $5 < t \leq 10$; $\pm 15 - 0,5 \cdot (t - 10)\%$ для $10 < t \leq 30$; $\pm 5 - 0,083 \cdot (t - 30)\%$ для $30 < t \leq 60$ та $\pm 2,5\%$ для $t > 60$ (рис. 1.1).

Відповідно до [18] ефективність таких випробувань залежить від:

- вартості та трудомісткості їх виконання;
- метрологічних характеристик випробувального обладнання.

Це вірне, але не повне твердження. Опрацювавши роботи дослідників [19-22] доречно стверджувати, що ефективність випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій залежить від більшої кількості чинників, зокрема:

1. Відповідності методики випробувань нормативним вимогам. Важливо, щоб випробування проводилися згідно з чинними стандартами (наприклад, ДСТУ, EN, ISO), що гарантує достовірність та порівнюваність результатів [19].
2. Точності відтворення умов пожежі. Ефективність оцінювання залежить від того, наскільки близько умови випробувань моделюють реальні температурні та механічні навантаження, які можуть виникати під час пожежі [20].
3. Якісної підготовки зразків. Результати можуть бути недостовірними, якщо зразки мають дефекти, пошкодження або виготовлені з відхиленнями від проектної документації [21].
4. Технічного рівня випробувального обладнання. Сучасні печі, системи вимірювання температури, деформацій і тиску дозволяють отримувати більш точні дані про поведінку конструкцій під час впливу високих температур [22].
5. Компетентності персоналу. Досвідчені фахівці здатні правильно інтерпретувати результати, уникати методичних помилок і коректно оформлювати протоколи випробувань [22].
6. Урахування конструктивних особливостей і реальних умов експлуатації. Важливо враховувати тип конструкції, спосіб її монтажу, вузли з'єднань, наявність додаткових навантажень, що впливають на її поведінку під час пожежі [22].

До засобів, що використовуються для випробувань за умовами стандартного температурного режиму, належать:

- спеціалізовані випробувальні печі;
- обладнання для монтажу зразка в піч для проведення вогневих випробувань;
- засоби вимірювання;
- технічні засоби для здійснення фото- та відеофіксації процесу.

Для підвищення ефективності таких установок необхідно дослідити:

- як тепловий обмін між поверхнями зразків та вимірювальними приладами впливає на результати випробувань;
- вплив характеристик потоків гарячих газів у печі під час випробувань;
- відмінності між умовами вогневих випробувань та реальними ситуаціями, що можуть виникнути на практиці [2-3].

Методика визначення вогнестійкості в умовах стандартного температурного режиму реалізується за допомогою випробувальних комплексів, що складаються з вогневої печі та пристрою для прикладення навантаження. Межу вогнестійкості фіксують за фактом досягнення конструкцією граничного стану.

Вогневі печі мають відповідати ряду технічних вимог:

- для створення нагрівального факела використовується рідке паливо;
- полум'я не повинно безпосередньо контактувати з поверхнею конструктивних елементів;
- температура у нагрівальній камері повинна бути рівномірно розподіленою;
- під час усього випробування температурний режим у печі має відповідати графіку, встановленому стандартом [4].

Відповідно до нормативних вимог [5], реалізація температурного режиму забезпечується шляхом згоряння рідкого пального, яке подається через автоматизовану систему. Як вказують дослідження [19-22], для забезпечення ефективного дифузного горіння паливо повинно попередньо випаровуватись без розкладу на пірогенетичні компоненти. Для цього воно розпилюється на дрібні

краплі за допомогою пари, стиснутого повітря або подається під тиском через спеціальні насадки насосними установками.

Печі обладнують сучасними комп'ютерними вимірювально-реєструвальними комплексами зі спеціальним програмним забезпеченням для збору та оброблення інформації щодо значень температури в печі та на зразках, вимірювання деформацій тощо. Такі печі дають змогу проводити випробування основних будівельних конструкцій і виробів, до яких сформульовано вимоги з вогнестійкості в нормативних документах [24-28].

У чинних стандартах регламентовано: якщо конструкція печі дає змогу це зробити, то можливе одночасне випробування більше ніж одного зразка залізобетонних конструкцій.

Вимоги [26] передбачають, що термопари в печі мають являти собою пластинчасті термометри – збірки, до складу яких входять вигнута пластина, виготовлена зі сплаву нікелю, термопара, прикріплена до неї, теплоізоляційний матеріал.

Вигнута металева пластина має бути виготовлена зі смужки спеціального аустенітного сплаву на основі нікелю, стійкого до окислення за високої температури, довжиною (150 ± 1) мм, шириною (100 ± 1) мм і товщиною $(0,7 \pm 0,1)$ мм, вона повинна бути зігнута з таким розрахунком, щоб забезпечити будову, продемонстровану на рис. 1.5 [26]. Між мідним диском і поверхнею зразка для випробування, а також між мідним диском і теплоізоляційною накладкою не повинно бути в'язучої речовини.

Вимірювальний спай має складатися з дротів термопари типу «хромель – алюмель» (типу К), згідно з [26], що розташовані в мінеральній ізоляції всередині оболонки, виготовленої із жаростійкого сталевого сплаву, номінальним діаметром у межах від 1 мм до 3 мм. Гарячі спаї повинні бути електрично ізольовані від оболонки. Гарячий спай термопари має бути закріплений у геометричному центрі пластини в точці, зображеній на рис 1.5, за допомогою смужки невеликого розміру, виготовленої з того самого матеріалу, що й пластина. Смужку можна приварювати до пластини, також прикріплювати до пластини гвинтами для полегшення заміни

термопари. Розміри смужки мають бути приблизно $18 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$ у разі її точкового приварювання до пластини. У випадку її прикріплення до пластини гвинтами номінальні розміри дорівнюють $25 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$. Діаметр гвинта має бути 2 мм.

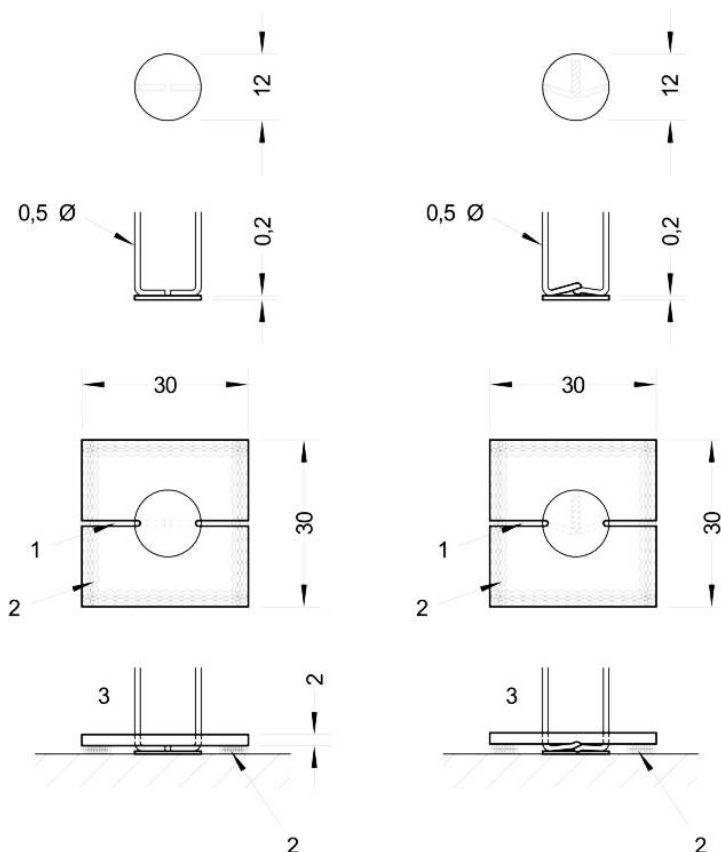


Рисунок 1.5. Будова пластинчастого термометра (розміри зазначено в міліметрах).

Збірку, що складається з пластини й термопари, потрібно оснащувати накладкою, виготовленою з неорганічного ізоляційного матеріалу, із номінальними розмірами $(97 \pm 1) \text{ мм} \times (97 \pm 1) \text{ мм}$ і товщиною $(10 \pm 1) \text{ мм}$, густина якого дорівнює $(280 \pm 30) \text{ кг/м}^3$.

Перед першим використанням пластинчастих термометрів складчасту частину потрібно піддати старінню через розміщення в печі, нагрітій до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, на 1 год. Можливо, щоб ця частина зазнала теплового впливу в печі для випробувань

вможливають закріплення зразка відповідно до проєктної документації (наприклад, жорсткі рами), а також засоби для забезпечення вільного спирання зразка на стінках печі.

Зразок має бути встановлений у печі залежно від напрямку можливого впливу пожежі на конструкцію, межу вогнестійкості якої треба визначити. Тому в конструкції печі, призначеної, наприклад, для випробування вертикальних огорожувальних конструкцій, слід передбачити нагрів зразка з одного боку. Для випробування горизонтальних конструкцій (перекриттів, покриттів тощо) у печах має бути нагрів знизу.

1.3. Особливості розрахункового оцінювання межі сталезалізобетонних плит

Недоліки, що має експериментальний метод, не властиві розрахунковим методам, оскільки вони не обмежені величиною і типом навантаження, типом закріплення плит, їх розмірами та конфігурацією [10-13]. Крім цього, розрахунковий метод є менш вартісним, не потребує додаткових спеціальних умов та є менш трудомістким.

Розрахункові методи мають різну обчислювальну базу. Умовно їх можна розділити на спрощені методи і уточнені методи.

Спрощені методи – це методи, що використовують напівемпіричний підхід, а також спрощений інженерний підхід, що має у основі комплекс гіпотез, які не мають суворого теоретичного обґрунтування. Це дозволяє використовувати нескладні алгебраїчні формули і рівняння. На рис. 1.6. подана структура спрощених розрахункових методів оцінювання межі вогнестійкості (ОМВ) сталобетонних та сталезалізобетонних плит в умовах пожежі із стандартною температурною кривою.

Спрощені методи засновані на використанні спеціальних таблиць, де вказані мінімальні розміри товщини плит та захисного шару. При цьому вони не потребують складних розрахунків, а їх методики увійшли до відповідних норм багатьох держав [30–37].

Табличні методи мають суттєвий недолік, що полягає у невисокій точності результатів (похибка біля 30 – 40%) [38–41]. Вказана похибка пояснюється тим, що дані таблиці узагальнюють великий емпіричний досвід із великим розкидом геометричних параметрів плит, їх навантаження та умов закріплення [42–44]. Тому табличний метод застосовується тільки у випадку, коли необхідно швидко оцінити клас вогнестійкості, при цьому не звертається увага на можливий суттєвий запас міцності, який можна отримати [44–47].



Рисунок 1.7. Структурна схема спрощених розрахункових методів прогнозування функціонування сталобетонних та сталезалізобетонних плит в умовах пожежі із стандартним температурним режимом.

Всі інші розрахункові методи зазвичай розділяються на дві автономні задачі – теплотехнічну та міцності [45–48]. Теплотехнічна задача вирішується з використанням напівемпіричних, або теоретичних методах. Статична задача вирішується за допомогою застосування різних моделей напружено-деформованого стану (НДС) бетону та арматурної сталі [49–51].

При застосуванні теоретичного підходу, який заснований на базових континуальних рівняннях теплопровідності та НДС у часткових похідних і їх реалізації одним із чисельних методів з врахуванням температурних деформацій та деформації текучості, повзучості у сталевих елементів та шарі бетону, називається уточненими методами [52, 53].

Для розв'язку теплотехнічної задачі необхідно застосувати одну з математичних моделей теплопровідності. Для комбінованої конструкції бетонної плити та сталевго двотавра температура може визначатися як показано на схемі, що наведена на рис. 1.8 [54-55].

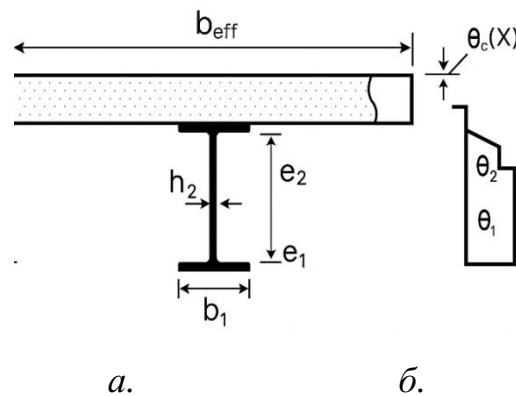


Рисунок 1.8. Поперечний переріз сталобетонної плити (а) та епюра розподілу температури у ньому (б).

Підвищення температури $\Delta\theta_{a,t}$ окремих частин незахищеної сталевго балки протягом інтервалу часу Δt може визначатися за формулою [23]:

$$\Delta\theta_1 = k_{sh} \left(\frac{1}{c_a \rho_a} \right) \left(\frac{A_i}{V_i} \right) \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (1.2)$$

де k_{sh} – поправочний коефіцієнт затемнення даної конструкції іншими; c_a – питома теплоємність сталі згідно, [Дж/кг К]; ρ_a – густина сталі, [кг/м³]; A_i – площа незахищеної поверхні частини i сталевго поперечного перерізу на одиницю довжини, [м²/м]; A_i/V_i – коефіцієнт поперечного перерізу [м⁻¹]

частини i сталевго поперечного перерізу; V_i – об’єм частини i сталевго поперечного перерізу на одиницю довжини $[\text{м}^3/\text{м}]$; $\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$ – розрахункове значення чистого теплового потоку на одиницю площі за [65], $[\text{Вт}/\text{м}^2]$; $\dot{h}_{net,c} = \alpha_c(\theta_t - \theta_{a,t})$, – розрахункове значення теплового потоку на одиницю площі за рахунок конвекції, $[\text{Вт}/\text{м}^2]$; $\dot{h}_{net,c} = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_m \varepsilon_f [(\theta_t + 273)^4 - (\theta_{a,t} + 273)^4]$ – розрахункове значення теплового потоку на одиницю площі за рахунок променистого теплообміну, $[\text{Вт}/\text{м}^2]$; ε_m – ступінь чорноти матеріалу конструкції; ε_f – ступінь чорноти випромінювання вогню за [56–60]; θ_t – температура пожежного середовища у даний момент часу t , $[\text{°C}]$; $\theta_{a,t}$ – температура сталі у даний момент часу t , $[\text{°C}]$, вважається однаковою в кожній частині сталевго поперечного перерізу; Δt – інтервал часу, $[\text{с}]$;

Коефіцієнт затемнення може бути визначений за формулою [61–65]:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{e_1 + e_2 + 0,5b_1 + \sqrt{h_w^2 + 0,25(b_1 - b_2)^2}}{h_w^2 + b_1 + 0,5b_2 + e_1 + e_2 - e_w}, \quad (1.3)$$

де e_1 , b_1 , e_w , h_w , e_2 , b_2 – розміри поперечного перерізу згідно з рис. 1.8.

Підвищення температури $\Delta\theta_{a,t}$ різних частин сталевї балки з ізолюючим покриттям за інтервал часу Δt можна отримати за формулою [66]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \left[\left(\frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \right) \left(\frac{A_{p,i}}{V_i} \right) \left(\frac{1}{1 + w/3} \right) (\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t \right] - [(e^{w/10} - 1) \Delta\theta_t], \quad (1.4)$$

$$w = \left(\frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \right) d_p \left(\frac{A_{p,i}}{V_i} \right),$$

де: λ_p – теплопровідність вогнезахисного матеріалу, $[\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°C}]$; d_p – товщина вогнезахисного покриття, $[\text{м}]$; $A_{p,i}$ – площа внутрішньої поверхні вогнезахисного

матеріалу на одиницю довжини частини i сталевго елемента, $[м^2/м]$; c_p – питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, $[Дж/кг \cdot ^\circ C]$; ρ_p – густина вогнезахисного матеріалу, $[кг/м^3]$.

Температура у бетонній плиті визначається за допомогою положень що викладені в стандартах [24, 25]. Для цього може бути використана номограма, що наведена на рис. 1.9.

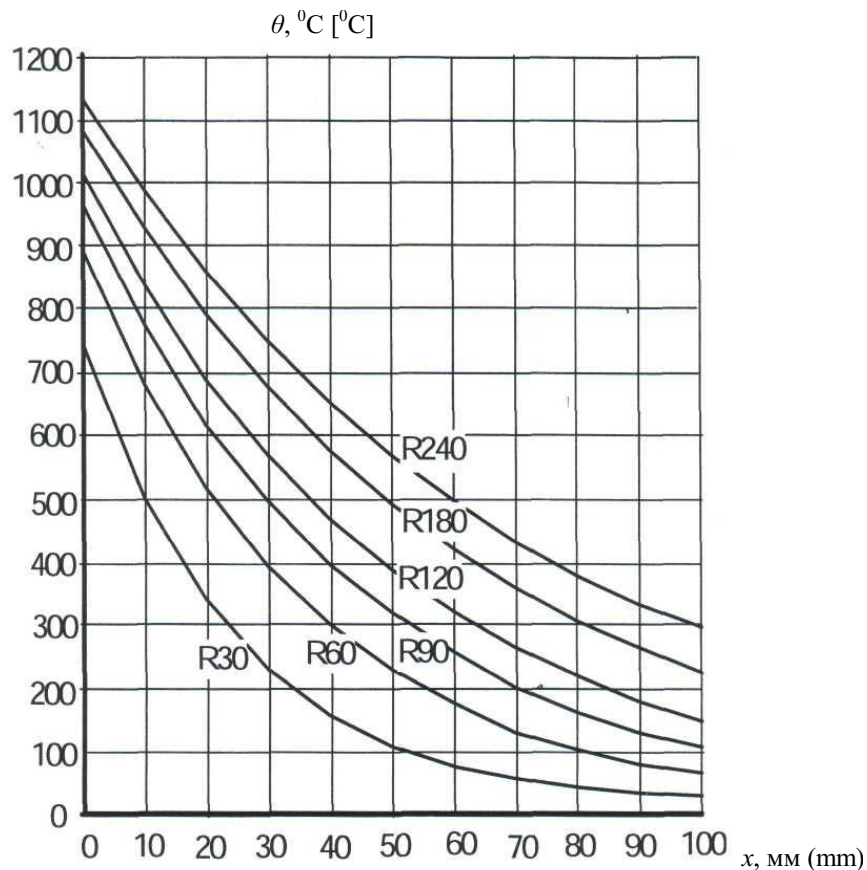


Рисунок 1.9. Номограма для визначення температурного розподілення у залізобетонній плиті товщиною більше за 200 мм.

Для вивчення розподілень температури по перерізах бетону сталезалізобетонних плит використовується розрахункова методика, заснована на розв'язку рівняння теплопровідності із граничними умовами III роду встановлена чинними стандартами України і детально описана у роботах [23, 29]. Гранична

задача при цьому формулюється з використанням розрахункової схеми, яка подана на рис. 1.10.

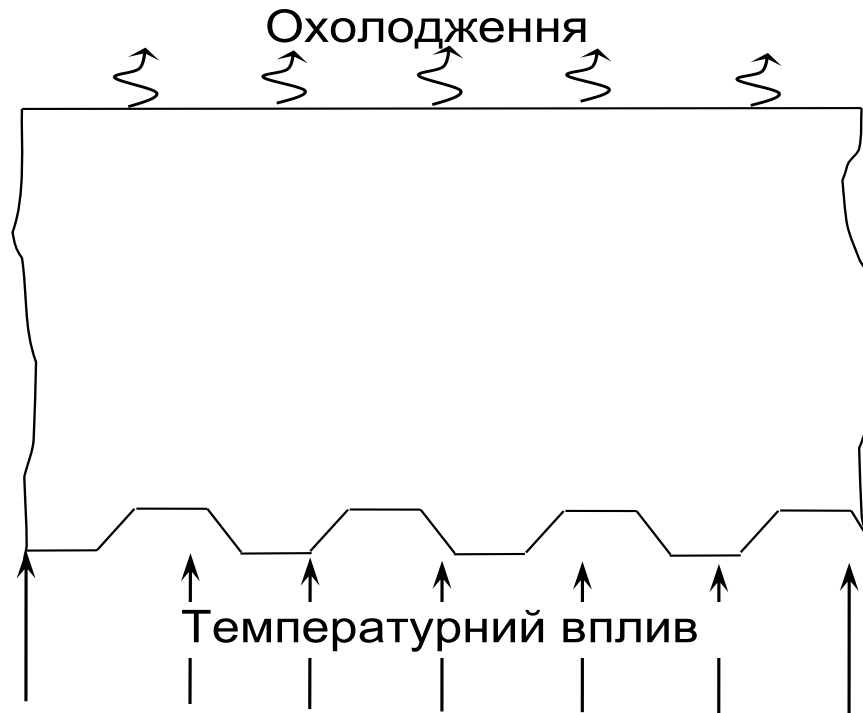


Рисунок 1.10. Розрахункова схема при односторонньому нагріву сталезалізобетонної плити.

Математична модель теплопередачі у цьому випадку добре описана у роботах [64, 65]. При цьому використовується рівняння теплопровідності у такому вигляді:

$$c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (1.5)$$

де $c(\theta) = \rho(\theta)c_p(\theta)$ - питома об'ємна теплоємність.

Вираз, який відповідає ГУ III роду на обігрівній поверхні записується у вигляді:

$$-\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=b} = \alpha_P (\theta_P - \theta_W). \quad (1.6)$$

де θ_P θ_W – температури відповідно пожежного середовища та поверхні елементу з обігрівної сторони.

На не обігрівній поверхні елементу вираз для ГУ III роду записується у вигляді:

$$-\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (293 - \theta_n), \quad (1.7)$$

де α , α_n – коефіцієнти теплообміну на обігрівній та не обігрівній поверхні відповідно.

Для чисельного розв'язку рівняння теплопровідності застосовується метод кінцевих різниць.

Для рівняння теплопровідності у запису (1.7) при його лінеаризації застосовується інтегро-інтерполяційний метод [66].

Ліва частина рівняння теплопровідності у кінцевих різницях записується у вигляді виразу [66]:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = c \left(\frac{\theta_{i,k} + \theta_{i,k+1}}{2} \right) \cdot \frac{\theta_{i,k+1} - \theta_{i,k}}{\Delta t}. \quad (1.8)$$

Права частина рівняння (1.7) з точністю $O(h^2 + \Delta t)$ у кінцевих різницях має такий вигляд [1–6]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = a_x \theta_{i-1,k}^x - (a_x + b_x) \theta_{i,k} + b_x \theta_{i+1,k}^x \quad (1.9)$$

При залежності від температури коефіцієнту теплопровідності останній визначається з використанням інтегро-інтерполяційного методу [66] за такими виразами:

$$a = \frac{\lambda(\theta_{i-1})\lambda(\theta_i)}{(\lambda(\theta_{i-1})+\lambda(\theta_i))h^2}, b = \frac{\lambda(\theta_{i+1})\lambda(\theta_i)}{(\lambda(\theta_{i+1})+\lambda(\theta_i))h^2} \quad (1.10)$$

При використанні виразів (1.8)–(1.10) рівняння теплопровідності записується у вигляді рекурентних формул у вузлових точках для $k+1$ -го часового шару попередньо визначеними температурами k -того часового шару. Рекурентні формули записуються в неявному вигляді і розв’язуються як нелінійні рівняння.

ГУ III роду у кінцевих різницях записуються у вигляді [66]:

$$\frac{\lambda(\theta_{w_k})\lambda(\theta_{1,k})}{\lambda(\theta_{w_k})+\lambda(\theta_{1,k})} \cdot \frac{\theta_{w_k}-\theta_{1,k}}{h} + \frac{h \cdot c(\theta_{1,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (\theta_{1,k} - \theta_{1,k-1}) = \alpha_k (\theta_{1,k} - \theta_{p,k}) \quad (1.11)$$

де θ_p – температура пожежі, що відповідає стандартному температурному режимові і визначається за формулою (1.2); α – коефіцієнт теплообміну; $h \sim 0.02$ м – крок розбиття перерізу; $\Delta t = 60$ с – часовий крок.

Часовий і просторовий крок вибирається за умовою збіжності вибраної кінцево-різницевої схеми. Також часовий крок за можливістю вибирається рівним 1 хв, відповідно до контрольного проміжку часу при проведенні вогневих випробувань.

При розв’язку статичної задачі для сталезалізобетонних плит використовується метод граничних станів, що полягає у визначенні несучої здатності за критичними деформаціями у її перерізі [23]. Для цього використовується розрахункова схема перерізу представлена на рис. 1.11. На даній схемі показана епюра граничних деформацій і відповідна їй силова схема.

Використовуючи розрахункові схеми, що представлені на рис. 1.11 визначається несуча здатність у вигляді моменту пари сил, відповідному силовій схемі за критичними деформаціями [24].

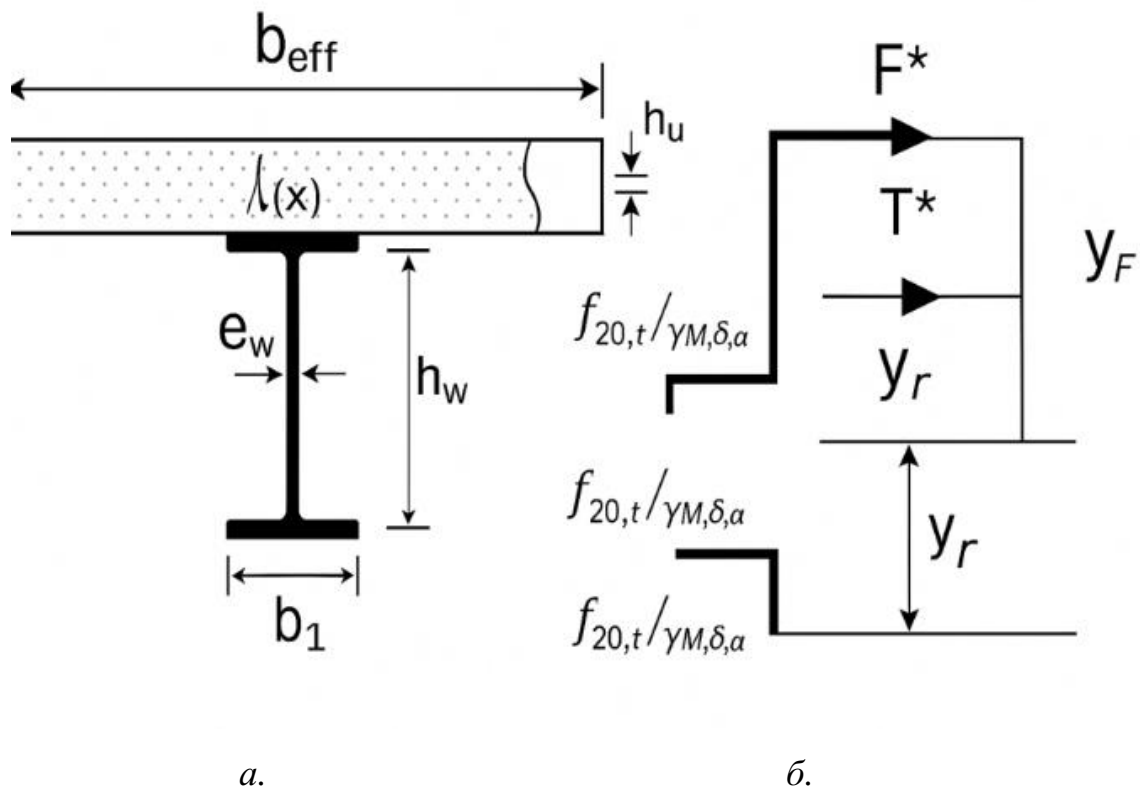


Рисунок 1.11. Розрахункова схема перерізу стале залізобетонної плити (а) та епюра граничних напружень у сталевому елементі і стиснутому шарі бетону разом із силовою схемою (б).

Розтягуюча сила у сталевому елементі для схеми на рис. 1.11 визначаються за формулою [66]:

$$T^+ = [f_{ay,\theta 1} \cdot (b_1 e_1) + f_{ay,\theta w} \cdot (h_w e_w) + f_{ay,\theta 2} \cdot (b_2 e_2)] / \gamma_{M,fi,a}$$

$$y_T = [f_{ay,\theta 1} \cdot (0,5 b_1 e_1^2) + f_{ay,\theta w} \cdot (h_w e_w) (e_1 + 0,5 h_w) + f_{ay,\theta 2} \cdot (b_2 e_2) (h - 0,5 e_2)] / (T^+ \cdot \gamma_{M,fi,a}) \quad (1.12)$$

де $f_{ay,\theta}$ – максимальний рівень напруження у двотаврі за температури θ згідно із схемою на рис. 1.11, [МПа]; $\gamma_{M,fi,a}$ – коефіцієнт запасу міцності конструкційної сталі при пожежі.

З огляду на схему рис. 1.11 та формулу (1.12) можна визначити товщину стиснутої зони бетону за формулою [66]:

$$h_u = T^+ \cdot \gamma_{M,fi,c} \cdot b_{eff}^{-1} f_c^{-1}, \quad (1.13)$$

де $\gamma_{M,fi,c}$ – коефіцієнт запасу міцності бетону плити за нормальних умов; f_c – міцність бетону плити на стискання, [МПа].

За значенням розтягуючою силою визначається граничний момент у перерізі сталевобетонної плити за формулою [23]:

$$M_{fi,Rd^+} = T^+(y_F - y_T), \quad (1.14)$$

де відстань до середини стиснутої зони бетону визначається як [67, 68]

$$y_F \approx \mathbb{Z} + \mathbb{Z}_c - (\mathbb{Z}_u/2). \quad (1.15)$$

Даний спрощений підхід має недоліки, що полягають у неможливості врахування арматури у бетонній плиті, неможливості врахування зниження міцнісних та деформативних властивостей бетону внаслідок його деградації під впливом нагрівання, крім цього спрощення, що були прийняті для створення даних методик, можуть вести до суттєвої похибки і завищення запасу ресурсу структуру при її аварійній роботі в умовах пожежі.

Існують також інші підходи до розрахунків. Часто різні варіанти розрахунку можуть давати точніші дані для окремих видів матеріалів, граничних умов та особливостей початкових даних. Тому вибір конкретного інструменту та математичного апарату доцільно пристосовувати до конкретного випадку.

1.4. Мета і завдання дисертації

Мета дослідження полягає в підвищенні точності, ефективності та достовірності визначення межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, а також зниження трудомісткості процесу оцінювання шляхом удосконалення експериментально-розрахункового методу такої оцінки.

Для досягнення поставлених цілей були сформовані такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні методи експериментального та розрахункового оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит, виявити їхні переваги та обмеження, визначити науково-практичні передумови до розроблення удосконаленої методики оцінювання вогнестійкості.

2. Проаналізувати особливості комп'ютерного моделювання процесів тепломасообміну у сталезалізобетонних плитах з гофрованим профілем під впливом пожежі та описати алгоритм побудови моделей теплового впливу на конструкції у вогневих печах засобами CFD-програмних комплексів.

3. Розробити й обґрунтувати методику проведення експерименту з вогневих випробувань фрагментів сталезалізобетонних плит у малогабаритній вогневій установці, встановити умови його виконання, а також систематизувати результати температурних вимірювань у контрольних точках.

4. Розробити удосконалення для експериментальної та розрахункової частини методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем шляхом обґрунтування алгоритму визначення температурних полів усередині конструкції на основі точкових температурних вимірювань, отриманих під час експерименту, та подальшого розрахунку її несучої здатності з урахуванням фактичних геометричних розмірів, просторової орієнтації й прикладеного навантаження.

5. Розробити алгоритм практичного застосування удосконаленої методики оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит, який охоплює підготовку зразків, проведення експериментів, обробку температурних даних, визначення міцності конструкції та валідації отриманих результатів.

РОЗДІЛ 2.

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТАХ З ГОФРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ ТА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТЕМПЕРАТУРНИХ РОЗПОДІЛІВ

2.1. Особливості комп'ютерного моделювання процесів тепломасообміну під час нагрівання сталезалізобетонних плит

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 [69, 70] 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 [71].

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 [69]. 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 [69–71].

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 [72, 73], 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 [69]. Вищезазначені рівняння застосовують у математичному моделюванні багатьох природних явищ, технічних задач та є одними із найважливіших у гідродинаміці.

Для цих цілей використовують фундаментальні рівняння [70]:

- 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.

Повна система рівнянь
Нав'є–Стокса



Рисунок 2.1. Теоретична база для розв'язку задач теплообміну усередині закритих об'ємів.

Система рівнянь Нав'є – Стокса, у звичайному вигляді має два рівняння, а саме: рівняння руху та рівняння нерозривності. Ця система добре описана в роботі [74].

Математичні моделі, що існують, їх чисельна реалізація дають змогу ефективно та точно змодельовати процес вогневих випробувань плит на вогнестійкість.

Значення аналізованих функцій у певний момент часу отримаємо унаслідок виконання низки послідовних ітерацій, які детально описано у роботі [74]. 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 [69–71]. 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 сталезалізобетонні плити 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 [71].

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

де C_v – 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 [24, 25], рекомендують використовувати стандартну температурну криву пожежі [26–28] для визначення вогнестійкості сталезалізобетонних плит.

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 сталезалізобетонних плитах 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 [69–71].

2.2. Аналіз основних характеристик програмних комплексів обчислювальної газогідродинаміки

У галузі газогідродинаміки експериментальні та теоретичні підходи до дослідження явищ перебувають у тісному функціональному взаємозв'язку, доповнюючи одне одного. Проведення експериментів може здійснюватися як у лабораторних умовах, так і безпосередньо у природному середовищі – так званий натурний експеримент. Проте організація будь-якого експериментального

дослідження супроводжується низкою обмежень, зокрема матеріально-технічного характеру, що можуть ускладнювати його реалізацію. Крім того, сама процедура експерименту часто вимагає розробки окремого інженерного рішення, яке передбачає створення умов, необхідних для якісної візуалізації процесів, стабільного протікання явища та забезпечення достовірного вимірювання фізичних параметрів. У зв'язку з цим усе більшої актуальності набуває комплексний підхід, який поєднує фізичне моделювання з числовим аналізом, зокрема для дослідження складних нелінійних процесів течії рідини або газу в екстремальних умовах [29].

У роботі [75] детально проаналізовано функціональні можливості програмного комплексу Fire Dynamics Simulator (FDS), що розробляється Національним інститутом стандартів і технологій США (NIST). Цей програмний продукт призначений для чисельного моделювання тепломасообмінних процесів, які виникають під час розвитку пожеж у різноманітних будівельних або інженерних середовищах. FDS дозволяє проводити розрахунки вогнестійкості конструкцій, прогнозувати час до блокування шляхів евакуації димом, визначати момент спрацювання пожежних сповіщувачів і спринклерів, а також моделювати динаміку поширення продуктів горіння.

Ключовою особливістю FDS є те, що вона не потребує апіорних припущень щодо структури потоку. Це дає змогу використовувати її для моделювання широкого спектра об'ємно-планувальних рішень і геометрій. Проте варто зазначити, що комплекс орієнтований переважно на низькошвидкісні потоки (до ~ 50 м/с), і не призначений для моделювання вибухів. Основною метою FDS є розв'язання прикладних задач у сфері пожежної безпеки, а також дослідження фундаментальних фізичних процесів, що відбуваються в умовах пожежі [61].

Гідродинамічна модель, реалізована в FDS, базується на чисельному розв'язанні рівнянь Нав'є–Стокса для температурно-залежних, низькошвидкісних потоків. Обчислення здійснюється за схемою предиктора-коректора другого порядку точності як за просторовими координатами, так і за часом. Для моделювання турбулентності використовується метод масштабного моделювання вихорів (LES – Large Eddy Simulation), що забезпечує точне відображення великих

турбулентних структур. У випадках, коли застосовується надзвичайно тонка сітка, можливе також пряме чисельне моделювання (DNS), проте за замовчуванням FDS працює саме в режимі LES [76].

Модель горіння в FDS базується на спрощеному підході з використанням одноступеневої хімічної реакції. У такому разі розрахунок поля скалярної змінної дозволяє відстежувати масову частку окремих компонентів суміші – зокрема згорілого й незгорілого палива. Для задач, що потребують більшої точності, передбачено реалізацію двоступеневої реакції з описом стадій окислення палива до CO, а згодом – до CO₂. Крім того, програмний комплекс підтримує багатокрокові реакції з кінцевою швидкістю перебігу та можливістю обчислення масових концентрацій усіх ключових реагентів і продуктів за допомогою рівнянь стану [76].

Променистий теплообмін у FDS реалізовано для умов "сірого газу" шляхом розв'язання рівняння переносу випромінювання з використанням широкодіапазонної моделі. Обчислення виконуються методом скінченних об'ємів, аналогічним до того, що використовується для конвективного переносу. За типової конфігурації з приблизно 100 дискретними кутами, витрати ресурсів на моделювання променистого теплообміну становлять близько 20% від загального часу обчислень, що є прийнятним для інженерних задач [76].

У частині геометричного опису FDS працює виключно з прямокутною (ортогональною) сіткою. Усі перешкоди та елементи конструкції повинні бути представлені як прямокутні об'єми. Геометрія описується системою об'ємів, розташованих на прямолінійній декартовій сітці. Програмне забезпечення не допускає розрахунку, якщо окремі обчислювальні комірки на стиках між сітками не узгоджені або не відповідають умовам кубоподібності.

Якість обчислювальної сітки є критично важливою для забезпечення достовірності результатів. Сітка має бути вирівняною на межах блоків, а кожна комірка повинна бути максимально наближена за формою до куба. FDS не дозволяє запуск розрахунку при порушенні цих умов, що свідчить про орієнтацію системи на контрольовану точність та надійність моделювання [64].

Роботи [23, 29] стверджують про переваги використання програмного комплексу FlowVision (FV). Мотивують це тим, що CFD FlowVision – це комерційний програмний комплекс, призначений для чисельного моделювання задач комп'ютерної гідродинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics). В основі чисельного методу, реалізованого в FV, лежить підхід контрольних об'ємів, який дозволяє ефективно розв'язувати систему рівнянь Нав'є–Стокса для опису руху рідин і газів.

Програма призначена для моделювання складних потоків у різних інженерних і промислових задачах, враховуючи такі фізичні процеси, як турбулентність, теплоперенесення, конвекція, а також хімічні реакції. Однією з ключових переваг FlowVision є підтримка мультифізичних задач, тобто моделювання взаємодії між кількома фізичними явищами, наприклад, між течією рідини й тепловими ефектами або між гідродинамікою й хімічними перетвореннями.

Система дозволяє гнучко налаштовувати обчислювальні моделі відповідно до потреб користувача, зокрема обирати типи граничних умов, геометричних сіток, моделей турбулентності та інших параметрів. Крім того, FlowVision містить розвинені засоби для візуалізації та аналізу результатів: тривимірне зображення потоків, графіки розподілу параметрів, діаграми та анімації, що значно полегшує інтерпретацію отриманих даних.

Обчислювальна гідродинаміка (CFD) стала невід'ємним інструментом сучасної інженерної практики, досліджень і розробок у багатьох галузях науки та промисловості. Застосування CFD дозволяє змодельовати поведінку рідин і газів, аналізувати розподілення тиску, швидкості, температури, турбулентності та інших параметрів у складних середовищах і геометріях. Це особливо важливо для тих випадків, коли виконання фізичних експериментів є технічно складним, дорогим або взагалі неможливим [77–86].

Ці переваги дозволяють обрати комплекс FV для розрахунків тепломасообміну і в даній роботі. Проте, доцільно розглянути й більш сучасні

програмні комплекси. В таблицю 2.1. зведені дані щодо їхніх основних переваг та недоліків.

Таблиця 2.1.

CFD-програми для моделювання високотемпературних процесів

Назва	Підхід	Горіння	Ліцензія	Основна перевага	Основний недолік
CONVERGE CFD [77]	RANS/LES	+	Комерційна	Автоматична генерація сітки для складної геометрії	Висока вартість ліцензії
STAR-CCM+ [78]	FV, multiphysics	+	Комерційна	Інтеграція з CAD, мультифізичне моделювання	Потребує потужних ресурсів
Altair CFD [79]	Navier–Stokes	+	Комерційна	Гнучкість під різні задачі та інтерфейс користувача	Менш поширений серед дослідників
CHEM (Loc) [80]	FV, реактивна	+	Дослідницька	Призначений для хімічно активних течій	Потребує високої кваліфікації
Code Saturne [81]	FV	+	GPL	Відкритий код	Має складну систему налаштувань
KFX [82]	FV, k-ε, EDC	+	Комерційна	Оптимізований для пожеж та розсіювання газів	Малодоступний для академічного користування
FLACS [83]	FV, вибухи	+	Комерційна	Широко використовується в безпеці та оцінці вибухонебезпеки	Обмежена точність при складних хімічних реакціях
KIVA [84]	ALE, FV	+	Proprietary	Добре зарекомендований у двигунах внутрішнього згоряння	Застарілий інтерфейс і потреба адаптації
SU2 [85]	RANS/LES	+	LGPL	Гнучкість, модульність і відкритий код	Складна документація для новачків
MOOSE	FE,	+	LGPL	Підтримка	Крива

[86]	мультифізика			користувачьких фізичних моделей	навчання досить крута
------	--------------	--	--	---------------------------------	-----------------------

Одним із найбільш складних і критичних напрямів CFD-моделювання є аналіз високотемпературних процесів – зокрема горіння, теплових вибухів, конвективного та променистого переносу тепла. Завдяки CFD-системам можливо відтворити просторово-часову еволюцію температурних полів, динаміку поширення полум'я, концентрації продуктів згорання та зміну фізико-хімічних характеристик середовища. Це відкриває можливості для точного проектування енергетичних установок, систем вентиляції, протипожежного захисту, двигунів внутрішнього згорання, а також елементів конструкцій, що працюють в екстремальних термічних умовах.

CFD-програми підтримують моделювання мультифізичних процесів, де взаємодіють теплові, механічні, хімічні й гідродинамічні явища. Наприклад, вони дають змогу враховувати вплив теплового розширення газів на зміну течії, вплив хімічної реакції на температуру й тиск, а також симулювати розподілення шкідливих речовин, продуктів горіння або вибухових хвиль. Сучасні програмні комплекси дозволяють працювати із зонами високої температури, реалізують моделі турбулентного горіння, променистого теплообміну та фазових переходів.

Ще однією сильною стороною CFD є можливість візуалізації складних явищ. Тривимірна візуалізація температурних полів, швидкостей, векторів потоку, а також ізоліній концентрації продуктів згорання чи зони локального перегріву – все це дозволяє інженерам та дослідникам не лише аналізувати процес, але й пояснювати його іншим учасникам проєкту або замовникам. Це також критично важливо для виявлення критичних ділянок у конструкціях і зниження потенційних ризиків.

CFD-моделювання активно використовується у термозахисті, пожежній безпеці будівель і споруд, розрахунку теплоізоляції трубопроводів, проектуванні вентиляційних та протидимних систем, а також в авіаційній, автомобільній та енергетичній промисловості. У випадках, де важливо враховувати тепловий вплив на матеріали – наприклад, у розрахунках вогнестійкості будівельних елементів –

CFD дозволяє моделювати температуру в межах конструкцій з урахуванням реальних умов пожежі.

Завдяки стрімкому розвитку апаратного забезпечення та числових алгоритмів, сучасні CFD-системи стали доступнішими та ефективнішими. Вони надають широкі можливості для інженерної оптимізації, прогнозування наслідків аварій, створення безпечніших і ефективніших технічних рішень. Тому CFD є не лише інструментом дослідження, але й засобом управління ризиками, підвищення надійності та енергоефективності складних систем.

2.3. Особливості створення комп'ютерних моделей тепломасообміну у вогневих печах програмними комплексами CFD

Основою для проведення розрахунків у CFD-програмних коомплексах є правильно обрані дані препроцесора. Тобто, нам необхідно задати: граничні умови, визначити розмір та вид комірок, створити «розрахункову сітку», задати інші параметри ще до початку розрахунку.

У обчислювальному моделюванні течій рідини та газу за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) граничні умови (boundary conditions) відіграють ключову роль, оскільки визначають фізичну взаємодію обчислюваної області з її оточенням. Саме від коректного задання граничних умов залежить адекватність результатів симуляції реального фізичному процесу [75].

Граничні умови застосовуються на межах розрахункової області, задаючи поведінку змінних – таких як швидкість, тиск, температура, концентрація речовин – на цих межах. У фізичному сенсі це можуть бути вхідні або вихідні потоки, тверді стінки, симетрія або періодичність, відкриті межі чи умови контакту між різними середовищами (наприклад, рідина-тверде тіло).

Основні цілі використання граничних умов [75]:

- імітація впливу зовнішнього середовища (наприклад, температура навколишнього повітря);

- забезпечення енергетичного чи масового балансу на вході та виході системи;
- моделювання фізичних взаємодій на границі: прилипання потоку до стінки, теплообмін, реакції на поверхні;
- обмеження області моделювання до її найважливіших частин без втрати фізичної достовірності.

Таблиця 2.2.

Класифікація граничних умов у CFD

Тип умови	Опис	Приклад застосування
Вхідна умова (Inlet)	Задається швидкість, витрата, тиск, температура на вході потоку	Подавання повітря в камеру згоряння
Вихідна умова (Outlet)	Визначає тиск або масову витрату на виході	Відтік продуктів горіння
Непроникна стінка (Wall)	Модель непроникної твердої поверхні; можливе задання температури чи теплового потоку	Поверхня труби або плити
Симетрія (Symmetry)	Умова нульового градієнта; застосовується при моделюванні половини/четвертини об'єкта	Зменшення обчислювального обсягу
Періодичність (Periodic)	Крайові значення ідентичні на протилежних сторонах області	Турбулентні потоки в трубі або каналі
Відкрита межа (Open)	Потік може як входити, так і виходити через межу	Відкрите середовище при пожежі
Пористе середовище	Модель враховує опір фільтра, піноматеріалу або утеплювача	Розрахунок димоутримувальних перешкод

У задачах моделювання пожежі, горіння або теплового впливу вибір і правильне задання граничних умов набуває особливої важливості [75]. Наприклад:

- для вхідних отворів подачі повітря визначальним є контроль за температурою й кількістю кисню, що безпосередньо впливає на перебіг горіння.
- тверді стінки, які нагріваються, можуть бути змодельовані як із заданою температурою, так і з умовами теплопередачі (конвекція, променистий обмін).
- у розрахунках евакуації диму правильне задання вихідної умови є критичним для імітації димовидалення або блокування шляхів евакуації.

У FDS, наприклад, задаються такі типи граничних умов: VENT (вентиляційний отвір), SURF (поверхня з параметрами теплообміну), OBST (тверда перешкода), де кожна межа має свій набір термічних, газодинамічних і хімічних властивостей.

Доцільно сформулювати практичні рекомендації [75]:

1. Необхідно уточнювати тип процесу: горіння, охолодження, витік, турбулентний зсув.
2. Враховуйте симетрію: де можливо, використовуйте симетричні умови для зменшення обчислювальних витрат.
3. Не допускати відображення зворотного потоку на виході: часто призводить до нестійких розрахунків.
4. Дацільно проводити валідацію результатів через експеримент або реальні дані, особливо в задачах пожежної безпеки.

У середовищі FlowVision 2.5 реалізована гнучка система задання граничних умов, що дозволяє моделювати широкий спектр фізичних сценаріїв у задачах гідродинаміки, теплообміну та багатофазних взаємодій. Граничні умови в FlowVision задаються не тільки як числові значення фізичних параметрів, а й як комбіновані математичні вирази, що змінюються в просторі та часі – це дає змогу враховувати динаміку процесів в умовах складної взаємодії потоків і тепла [75].

Граничні умови в системі застосовуються до поверхонь розрахункової області – тобто граней геометричних об'єктів, які перетинають обчислювальну сітку. FlowVision дозволяє задавати як класичні типи граничних умов (вхідні, вихідні, стінки), так і спеціалізовані умови для моделювання рухомих тіл, джерел тепла або симетрії.

Окрім граничних, важливо задати адекватний початковий розподіл швидкості, температури, тиску, концентрацій реагентів тощо. Невідповідні початкові умови можуть призвести до неспівпадіння або нестабільності.

Застосування в задачах високих температур та горіння у FlowVision особливо ефективний у задачах з теплообміном та горінням. Важливо правильно задати:

- вхід повітря з певною температурою та вологістю;

- температурні умови на внутрішніх стінках печі або термокамери;
- постійний чи змінний тепловий потік на нагрівальних елементах;
- природний вихід димових продуктів на відкритому обрізі області.
- У таких задачах граничні умови можуть мати залежність від часу (імпульсний/циклічний вплив) або координати (градієнт температури на стінці). FlowVision дозволяє реалізовувати це через використання формул або зовнішніх профілів.

Таблиця 2.3.

Основні типи граничних умов у FlowVision

Тип умови	Призначення
Inlet (вхід)	Задає швидкість, тиск, температуру чи масову витрату речовини на вході
Outlet (вихід)	Дає змогу моделювати відтік без зворотного впливу на розрахункову область
Wall (стіна)	Застосовується до нерухомих або рухомих твердих поверхонь
Symmetry (симетрія)	Скорочує обсяг розрахунків, зберігаючи фізичну коректність
Moving Wall	Використовується для рухомих елементів (поршнів, клапанів, лопатей)
Heat Flux/Temp. BC	Задає тепловий потік або температуру на поверхні
Open boundary	Для середовищ із необмеженим простором або частково відкритої області
Interface boundary	Для моделювання взаємодії двох середовищ (газ/рідина, сталь/бетон тощо)

Особливості задання граничних умов [75]:

- граничні умови задаються через графічний інтерфейс або в модулі Setup;
- можна застосовувати умови для конкретних фаз у багатофазних задачах;
- доступна підтримка аналітичних профілів, зовнішніх файлів та скриптів для складних сценаріїв;
- умови можна задавати як локально (до конкретного фрагмента об'єкта), так і глобально.

У моделюванні пожежі, наприклад, у вентиляційній камері можна задати [75]:

- вхідний отвір (Inlet) з подачею повітря 25 °C;
- внутрішню стінку (Wall) з фіксованою температурою 600 °C;
- вихідний канал (Outlet) із умовою постійного тиску;
- тепловий потік на поверхні нагрівача – 40 кВт/м².

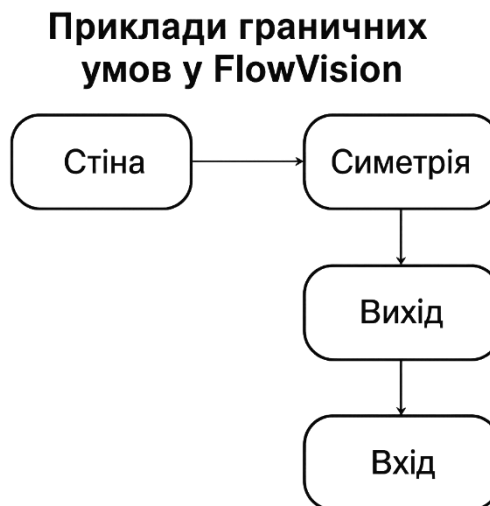


Рисунок 2.2. Теоретична база для розв'язку задач теплообміну усередині закритих об'ємів.

Граничні умови є ключовими параметрами, що визначають фізичну поведінку системи на межах розрахункової області, проте їхня ефективність значною мірою залежить від якості та структури самої розрахункової сітки. Саме тому наступним важливим етапом моделювання є побудова сітки, яка здатна точно відобразити геометрію об'єкта та забезпечити адекватну просторову дискретизацію для обчислювального експерименту [75, 76].

Сіткові моделі є основою більшості обчислювальних рішень у галузі комп'ютерної гідродинаміки. Вони використовуються для просторової дискретизації області моделювання, тобто розбиття складної геометрії на невеликі обчислювальні комірки (елементи або контрольні об'єми), у яких чисельно розв'язуються диференціальні рівняння, що описують поведінку рідини або газу.

Сітки поділяються за формою комірок (структуровані, неструктуровані), розміром (однорідні або адаптивні), а також за геометричною природою (двовимірні, тривимірні, поверхневі або об'ємні). Вибір типу сітки суттєво впливає на точність, стабільність і швидкість розрахунків, а також визначає можливість моделювання дрібних деталей або локальних явищ [75–86].

Таблиця 2.4.

Типи сіткових моделей у CFD-системах

Тип сітки	Характеристика	Приклади використання
Структурована	Побудована з правильних прямокутних або кубічних комірок	FDS, KIVA, старі версії ANSYS Fluent
Неструктурована	Використовує трикутні (2D), тетраедральні або полігональні (3D) елементи	STAR-CCM+, OpenFOAM, ANSYS Fluent
Гібридна	Поєднання різних типів елементів у межах однієї сітки	Altair CFD, COMSOL Multiphysics
Адаптивна (AMR)	Динамічно змінюється під час розрахунку в залежності від градієнтів величин	FLASH, деякі версії OpenFOAM
Ортогональна	Сітка, в якій осі комірок взаємно перпендикулярні	FDS (виключно прямокутна)

У більшості сучасних програм користувач може або імпортувати сітку з CAD-системи, або згенерувати її автоматично у вбудованому редакторі. Наприклад:

- у FDS сітка завжди прямокутна, з жорсткими вимогами до вирівнювання комірок на стиках;
- у OpenFOAM користувач має широкий контроль над генерацією неструктурованої сітки за допомогою blockMesh або snappyHexMesh;
- у STAR-CCM+ реалізована автоматична адаптивна генерація сітки, що дозволяє автоматично деталізувати критичні області.

Правильне проектування сітки – ключовий етап моделювання, адже від нього залежить не лише точність чисельного розв'язку, а й обчислювальні витрати. У задачах, пов'язаних із горінням або високотемпературним теплообміном, сітка

повинна бути досить тонкою в зонах реакцій і теплових градієнтів, що дозволяє коректно відтворити полум'яний фронт і теплові потоки.

У CFD-комплексі FlowVision 2.5 реалізовано специфічний підхід до побудови сіткових моделей, який вирізняється серед інших систем своєю адаптивністю, модульністю та інтеграцією з CAD-геометрією в режимі реального часу. Основна сітка в FlowVision побудована на основі структурованої прямокутної декартової сітки (Cartesian mesh), яка автоматично накладається на розрахункову область незалежно від складності імпортованої геометрії.

Однією з ключових особливостей FlowVision є використання так званої вбудованої сітки (Immersed Boundary Grid). Цей підхід дозволяє накладати об'єкт довільної геометрії на прямокутну сітку без необхідності її локального спотворення чи перетопологізації. Завдяки цьому забезпечується висока точність моделювання об'єктів складної форми без втрати топологічної простоти самої сітки.

FlowVision також підтримує адаптивне уточнення сітки в областях з високими градієнтами фізичних величин – зокрема температури, тиску або швидкості. Це особливо корисно при моделюванні високотемпературних потоків і горіння, де фронт полум'я або теплові шари вимагають більшої деталізації. Програма автоматично або за вказаними критеріями користувача зменшує розмір комірок у таких зонах.

Ще однією перевагою FlowVision є повна інтеграція сіткової побудови з CAD-середовищем, що дозволяє проводити обчислення безпосередньо на геометрії моделі без попереднього імпорту у зовнішній препроцесор. Оновлення геометрії призводить до миттєвого оновлення сітки, що значно спрощує інженерний цикл «модель–розрахунок–аналіз».

FlowVision дозволяє використовувати розподілені обчислення (HPC) з можливістю поділу сітки на блоки для паралельної обробки. Це критично важливо для моделювання складних задач з великою кількістю комірок, як-от турбулентне горіння або теплові впливи на конструкції в умовах пожежі.

Переваги сіткової моделі FlowVision 2.5 [29]:

- не потребує ручної побудови сітки в складних геометріях;

- підтримує локальне уточнення сітки за фізичними критеріями;
- висока швидкість побудови й адаптації сітки до змін геометрії;
- можливість автоматичного «вбудовування» складної CAD-геометрії без втрати якості розрахунку;
- підтримка паралельних обчислень на багатообчислювальних кластерах.

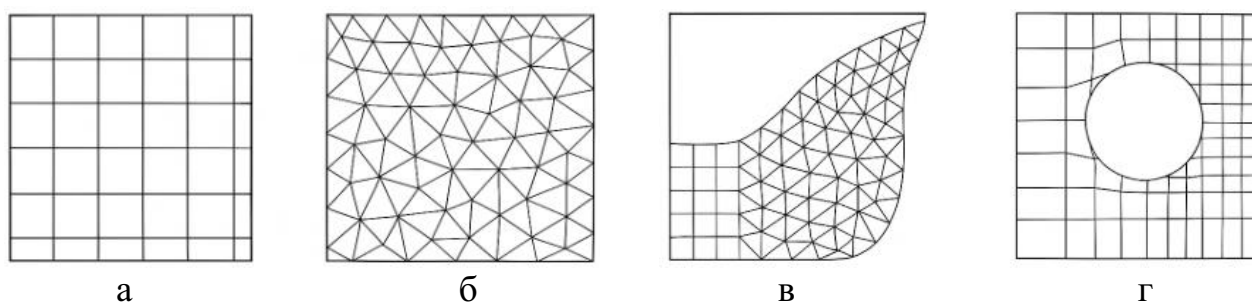


Рисунок 2.3. Приклад побудови розрахункової сітки: а – структурована; б – неструктурована; в – гібридна; г – адаптивна.

У CFD (Computational Fluid Dynamics) найчастіше використовуються структуровані сітки (structured meshes), однак для складних геометрій активно застосовують і неструктуровані сітки (unstructured meshes).

У чисельному моделюванні процесів теплообміну та горіння, особливо в межах CFD (обчислювальної гідродинаміки), існує кілька типів розрахункових сіток. Найпоширенішими з них є структуровані, неструктуровані та гібридні сітки. Кожен із цих видів має свої особливості, переваги та недоліки, і вибір конкретного типу залежить від задачі моделювання, складності геометрії та вимог до точності обчислень.

Структуровані сітки є найбільш уживаними в задачах з регулярною геометрією. Вони складаються з впорядкованих осередків (у 2D – прямокутників, у 3D – кубів або паралелепіпедів), що формують регулярну сіткову структуру. Основними перевагами структурованих сіток є простота реалізації, зручність при використанні чисельних методів (зокрема методу кінцевих різниць чи кінцевих об'ємів), а також висока ефективність розрахунків. Вони вимагають менше пам'яті та дозволяють швидко обчислювати градієнти й потоки. Проте їхнім істотним

недоліком є складність адаптації до складної геометрії об'єкта. В разі складних або криволінійних поверхонь потрібно або спотворювати осередки, або спрощувати саму геометрію, що може призвести до втрати точності [76].

Неструктуровані сітки – це гнучкіші структури, які складаються з трикутників у двовимірному та тетраедрів у тривимірному просторі. Вони особливо ефективні при моделюванні складних геометрій, таких як будівельні конструкції, сталезалізобетонні елементи з гофрованим профілем, або області з численними перешкодами. До переваг неструктурованих сіток належать легкість побудови навколо складних контурів, можливість згущення сітки в окремих зонах та гнучкість у локальній адаптації. Разом із тим, їхній основний недолік полягає в тому, що вони потребують більших обчислювальних ресурсів і складніші у програмній реалізації. Вони також можуть мати більші чисельні похибки в порівнянні з структурованими сітками.

Гібридні сітки поєднують елементи як структурованої, так і неструктурованої сітки. Найчастіше поблизу граничних поверхонь використовують призматичні або структуровані осередки, які дозволяють точніше враховувати вплив стінок (наприклад, у задачах теплопередачі), а в центральних частинах області – тетраедральну сітку. Це забезпечує компроміс між точністю та гнучкістю. Однак створення гібридних сіток є складним процесом, що потребує спеціалізованого програмного забезпечення та навичок. Крім того, не всі CFD-програми однаково ефективно працюють з такими сітками [75, 76].

Попри розмаїття можливих варіантів, у задачах із регулярними умовами найчастіше використовуються структуровані сітки через їхню простоту й ефективність. Але в реальних умовах інженерних розрахунків, особливо при аналізі пожежної безпеки та тепломасообміну в складних середовищах, усе частіше застосовуються неструктуровані або гібридні сіткові структури. Вони дозволяють точніше моделювати фізичні процеси та зменшити похибку внаслідок геометричних спрощень.

Під час моделювання необхідно також задати фізичні моделі, що відіграють ключову роль у відтворенні складних фізичних процесів, що відбуваються в

рідинному або газовому середовищі. Вони дозволяють точно описувати динаміку потоків, процеси теплообміну, фазових переходів, горіння, хімічних реакцій тощо.

Однією з найважливіших фізичних моделей є модель турбулентності, яка широко застосовується в технічних задачах. Вона забезпечує змогу відтворити складні флуктуації швидкостей та енергії в потоці. Існує кілька підходів до моделювання турбулентності: найбільш поширеними є RANS-моделі (Reynolds-Averaged Navier–Stokes), що використовують осереднені рівняння Нав'є–Стокса; LES (Large Eddy Simulation), яка дозволяє враховувати великомасштабні вихори; та DNS (Direct Numerical Simulation), що передбачає повне пряме чисельне моделювання турбулентного потоку – з високою точністю, але значними обчислювальними витратами [75].

Ще одним важливим аспектом є теплопередача, яка може включати теплопровідність, конвективне перенесення тепла та променистий теплообмін. CFD-програми дозволяють враховувати теплообмін як у рідких і газових середовищах, так і в твердих тілах. Зокрема, можна моделювати теплопередачу в конструкційних елементах, контактний теплообмін між різними тілами, а також фазові переходи – випаровування, конденсацію, плавлення тощо.

Особливе місце займають моделі горіння та хімічних реакцій, які використовуються для опису термохімічних процесів. У таких моделях застосовують як одноступеневі, так і багатоступеневі реакції з утворенням газоподібних продуктів, сажі, теплоти згорання. Для прикладних задач пожежної безпеки, наприклад у FDS, можуть використовуватись вогнединамічні моделі, що охоплюють спрощені схеми згорання для обчислення концентрацій продуктів реакцій.

Також важливою групою є моделі багатофазних потоків, які дають змогу моделювати взаємодію різних фаз у потоці – газу, рідини, твердих часток. Можуть застосовуватись моделі типу Euler–Euler, які описують поведінку кожної фази окремо у вигляді безперервного середовища, або Lagrangian–Euler підходи, в яких тверді частинки, краплі чи бульбашки описуються як окремі об'єкти. Враховуються також явища поверхневого натягу, коалесценції, розпаду крапель.

Окремо варто згадати компресійність середовища, яка стає критично важливою при моделюванні високошвидкісних або високотемпературних процесів. У таких випадках зміни густини та тиску мають суттєвий вплив на динаміку потоку, і тому в рівняння Нав'є–Стокса додаються відповідні поправки, що враховують змінність термодинамічних параметрів [75].

Таким чином, фізичні моделі в CFD є центральним компонентом, який забезпечує реалістичність чисельного моделювання й дозволяє охопити широкий спектр задач у сфері теплофізики, аеродинаміки, гідродинаміки, пожежної безпеки та інших галузях.

Комп'ютерна гідродинаміка (CFD) є потужним інструментом чисельного моделювання, що дозволяє з високою точністю аналізувати складні процеси течії, теплопереносу, турбулентності, горіння та взаємодії багатьох фізичних явищ у різних середовищах. Завдяки широким можливостям адаптації моделей до реальних умов та візуалізації результатів CFD-технології стали незамінними у сфері інженерних розрахунків, проектування та безпеки.

Одним із ефективних рішень для реалізації CFD-аналізу є програмний продукт FlowVision, який поєднує високу точність, гнучкість та зручність у роботі. До його ключових переваг належать: можливість моделювання складної геометрії без створення класичної об'ємної сітки (завдяки методиці «тіло в комірі»), реалізація мультифізичних задач з урахуванням взаємодії середовищ, зручна інтеграція граничних умов та підтримка паралельних обчислень. FlowVision ефективно застосовується для аналізу теплових режимів, вогнестійкості конструкцій, потоків при високих температурах та в умовах пожежного навантаження.

Таким чином, використання CFD-моделей, зокрема на базі FlowVision, відкриває широкі перспективи для наукових досліджень під час моделювання нагрівання сталезалізобетонних конструкцій у вогневих печах та не поступається сучасним програмним комплексам у точності результатів.

2.4. Особливості моделювання теплового впливу пожежі на сталезалізобетонні плити з гофрованим профілем

Сталезалізобетонні конструкції широко використовуються як у сфері громадського будівництва так і під час створення захисних споруд цивільного захисту. Використання монолітних перекриттів по профільованим настилам, дозволяє забезпечити високу швидкість зведення та зниження ресурса ємності, що дозволяє підвищити економічну ефективність будівництва та отримати міцне жорстке ребристе перекриття. Сталеві профільовані листи використовують спочатку як незнімну опалубку, а потім вони працюють спільно з бетоном у якості зовнішнього армування.

Сталезалізобетонні перекриття забезпечують збільшення жорсткості та несучої здатності конструкції. Проте вплив високих температур на дані будівельні конструкції досліджено не в достатній мірі. Неправильне визначення необхідного класу вогнестійкості даних будівельних конструкцій на стадії проектування будівель призводить до збільшення кількості небезпечних факторів у разі дії пожежі, пов'язаних із завданням шкоди для життя або здоров'я людини, майна або навколишнього середовища.

Доцільно підвищувати точність методів оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних перекриттів для гарантування стійкості будівель в умовах пожежі.

Дослідження вогнестійкості сталезалізобетонних перекриттів в Україні проводяться відповідно до нормованих вимог [26-28]. Передбачена можливість розрахункової оцінки та проведення експериментів з оцінювання вогнестійкості. Розрахункові методи прогнозування роботи сталезалізобетонних перекриттів не мають таких обмежень щодо розмірів досліджуваних зразків, але обмежені застосуванням коефіцієнтів під час визначення зміни теплотехнічних характеристик матеріалів. Дана робота описує метод поєднання позитивних моментів обох розрахунків та експериментів під час оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем.

Ціллю нагрівання є вирішення теплотехнічної задачі з прогріву матеріалу конструкції, тому плиту було розміщено вертикально під час експериментальних досліджень [10], а під час моделювання це відтворено.

Для створення геометричних моделей було використано CAD-програмний комплекс. Створено модель вогневої печі та будівельної конструкції. На рис. 1 представлено загальний вигляд.

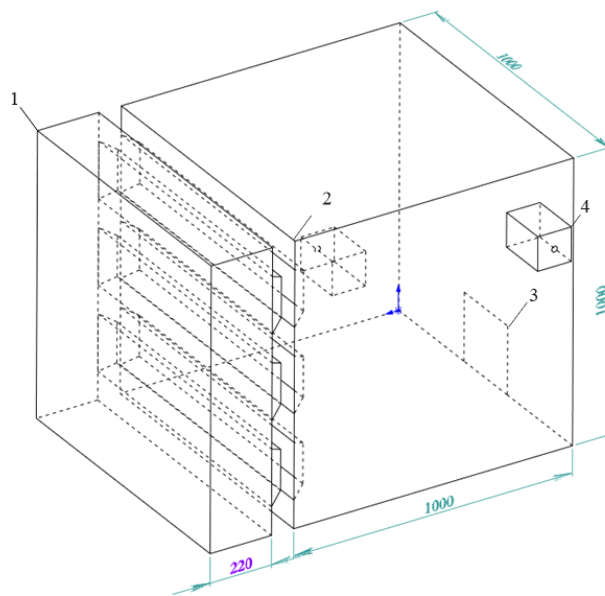


Рисунок 2.4. Геометричні параметри камери вогневої печі та фрагменту сталезалізобетонної плити (мм): 1 – сталезалізобетонна плита; 2 – камера печі; 3 – отвір для відведення продуктів горіння; 4 – пальник.

3-D модель, що показана на рис. 1, було імпортовано у програмний комплекс CFD. Для відтворення процесу тепломасообміну у вогневій печі застосовані математичні методи, засновані на використанні систем диференціальних рівнянь на основі неперервних середовищ типу Нав'є-Стокса, рівнянь теплопровідності, в умовах нагрівання під час пожежі та рівняння теплопровідності Фур'є.

Процес створення комп'ютерної моделі камери вогневої печі та накладення комірок для розрахунку відображено на рис. 2.5.

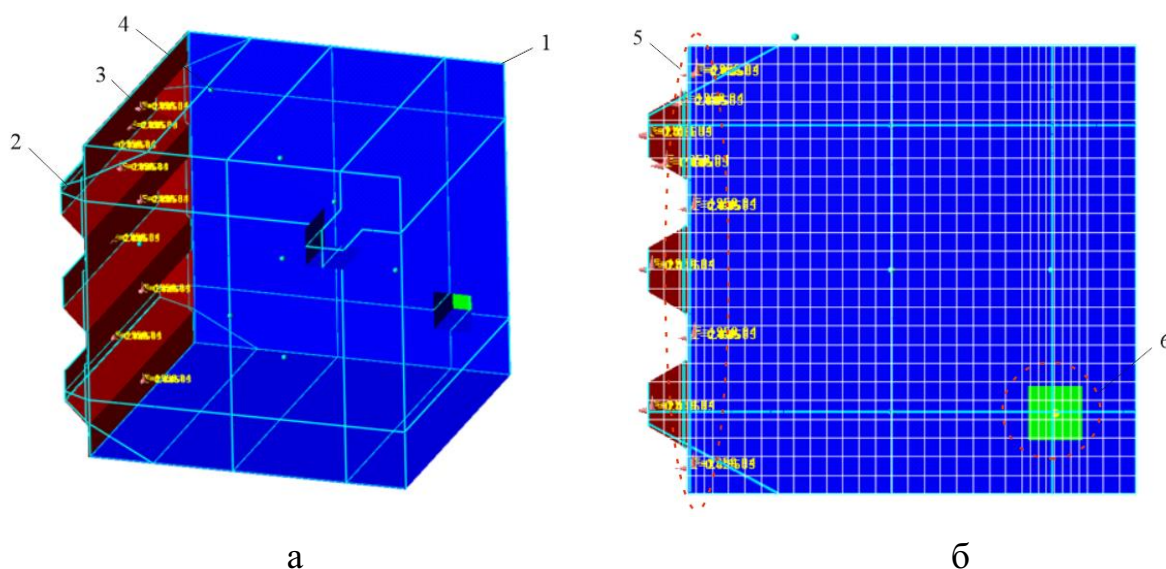


Рисунок 2.5. Вигляд імпортованої у CFD-програмний комплекс камери вогневої печі (а) та її сіткової моделі (б): 1 – камера печі; 2 – підобласть сполучення камери та будівельної конструкції; 3 – місця заміру температури безпосередньо біля поверхні гофрованого профілю; 4 – місця контролю температури у камері печі; 5 – область згущення розрахункової сітки біля фрагменту; 6 – область згущення розрахункової сітки в регіоні пальників.

У комп'ютерній моделі камери вогневої печі створено розрахункову сітку. Розмір комірок визначено із принципу розумної достатності, тобто обрано баланс між достатньою точністю і продуктивністю. Для цього більш «густу» розрахункову сітку створено у регіонах пальників та сполучення камери з фрагментом конструкції, що дозволило врахувати особливості інтенсивних турбулентних потоків у місцях горіння, а також теплообмін поблизу поверхні твердого тіла.

З метою візуалізації процесу розрахунку та отриманих результатів було створено заливку кольорів усередині камери печі та на поверхні конструкцій. Загальний вигляд початку розрахунку представлено на рис. 2.6.

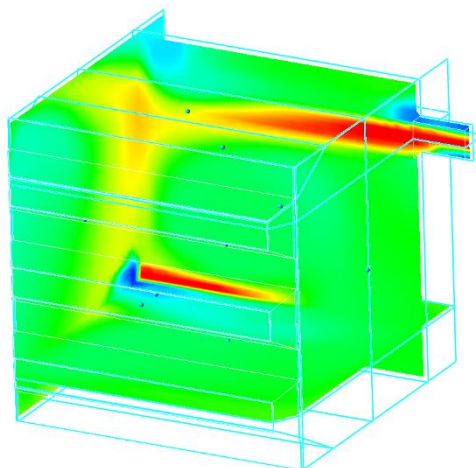


Рисунок 2.6. Візуалізація процесу розрахунку.

Під час моделювання температурний режим пожежі відповідав стандартному [25]. З цією метою, у процесі розрахунку коригувалася інтенсивність подачі горючої речовини.

Для дослідження достовірності та адекватності отриманих результатів доцільно застосовувати методи математичної статистики та порівняння розрахункових й експериментальних даних.

2.5. Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що чисельне моделювання процесів тепломасообміну в сталезалізобетонних плитах з гофрованим профілем є ефективним засобом аналізу їхньої вогнестійкості в умовах пожежі. Застосування CFD-моделей дозволяє детально відтворити температурні поля в конструкціях при стандартному температурному режимі пожежі.

2. Проведено аналіз можливостей сучасних програмних комплексів CFD, зокрема FDS та FlowVision, щодо моделювання високотемпературних процесів. Визначено переваги використання FlowVision для розв'язання задач теплопереносу у складних будівельних елементах, що обумовлено підтримкою мультифізичних процесів, адаптивною побудовою сітки та інтеграцією з CAD-системами.

3. Досліджено вплив структури розрахункової сітки та вибору граничних умов на достовірність результатів теплотехнічного моделювання. Показано, що правильне формування сітки та умов моделювання є ключовими чинниками у забезпеченні точності чисельного експерименту. Реалізовано сітку з локальним згущенням до 4 мм у зонах пальників та контакту зразка, що забезпечило стабільне моделювання температурних градієнтів.

4. Розроблено та реалізовано комп'ютерну модель фрагменту сталезалізобетонної плити у вогневій печі, що дозволило відтворити процес прогрівання та дослідити теплові характеристики в реалістичних умовах. Продемонстровано, що згущення сітки у зонах інтенсивного теплового впливу підвищує точність моделювання. Підтверджено доцільність поєднання чисельного моделювання з експериментальними дослідженнями для підвищення достовірності оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій, що дозволяє мінімізувати похибки і враховувати особливості реальної геометрії елементів.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБЛЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ ФРАГМЕНТІВ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ У МАЛОГАБАРИТНІЙ ВОГНЕВІЙ ПЕЧІ

3.1. Передумови для розроблення експериментальної методики вогневих випробувань фрагментів сталезалізобетонних плит у малогабаритній вогневій печі

Галузь будівництва постійно розвивають та вдосконалюють. Набуло широкого використання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем для облаштування перекриттів будівель різного призначення. Дані перекриття є монолітними і створюють їх безпосередньо на будівельних майданчиках. Проте, оцінювання вогнестійкості, як правило, проводять за розрахунковими методиками, що, в свою чергу, спричиняє появу похибок. Вони пов'язані з обмеженістю розрахункових методик щодо врахування особливостей матеріалу. У такому випадку неможливо гарантувати безпеку людей під час евакуації та достатній час для виконання завдань підрозділами оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час ліквідації пожеж.

Дослідженню особливостей проведення експериментів за допомогою малогабаритних вогневих печей у глобальному плані присвячені роботи [23, 29]. У роботі [23] запропоновано експериментально-розрахункові методики для перевірки вогнестійкості основних видів будівельних залізобетонних конструкцій, за запропонованими методиками із використанням малогабаритної вогневій печі проведено дослідження сталезалізобетонного фрагменту, що є розвитком попередніх робіт. Робота [29] розкриває удосконалену систему розміщення засобів вимірювальної техніки. В той же час присвячена лише залізобетонним стінам.

Існують вимоги щодо вогнестійкості подібних конструкцій, що регламентовано нормативними документами та процесу її оцінювання [25–27]. У

цих нормативних документах передбачена можливість проведення випробувань будівельних конструкцій, зокрема плит, без застосування навантаження на зразки. Це стосується тих випадків, коли в лабораторних умовах через технічні обмеження неможливо відтворити умови навантаження. Стандарти допускають випробування як фрагментів будівельних конструкцій, так і повномасштабних елементів. Проте тестування нестандартних і великогабаритних конструкцій є складним через значні фінансові та трудові витрати, а також через обмеження розмірів випробувальних печей, які можуть бути меншими за розмір досліджуваних зразків. Крім того, такий підхід є неекологічним.

У дослідженні [87] представлено експеримент з нагрівання малогабаритних елементів залізобетонних конструкцій у компактній вогневій печі, що працює за стандартним температурним режимом пожежі, та описано процес верифікації отриманих експериментальних даних. Проте проведені дослідження стосуються виключно фрагментів колон. Робота [88] демонструє особливості конфігурації малогабаритної вогневої печі. Проте у роботі не вказано яким саме чином необхідно встановлювати сталезалізобетонні конструкції. Проте робота [89] пояснює, що для плит і стін не є суттєвої різниці орієнтація у просторі. В той же час дане дослідження стосується лише залізобетонних плит. У роботі [90] розглянуто сталезалізобетонні плити з армуванням ребер вертикальними сталевими листами та проаналізовано результати їх експериментальних досліджень зміни їхньої міцності. Проте, не містить досліджень особливостей прогрівання внутрішніх шарів під час нагрівання за умов пожежі. За результатами представленими у [91] встановлено, що оцінювання вогнестійкості, обраних для обчислювального експерименту, сталезалізобетонних плит протягом 120 хв. теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі не настає. Проте не вказано яким чином враховують особливості матеріалів, що входять до складу залізобетону та якість металу гофрованого профілю.

На основі викладеного вище, можливо розробити методику, що буде відповідати особливостям прогрівання сталезалізобетонних плит з гофрованим

профілем під час теплового впливу пожежі та доцільно провести експериментальні дослідження, а також проаналізувати отримані результати.

3.2. Виготовлення зразків для випробувань та зовнішні умови

Фрагменти сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем (далі – фрагменти) номінальним розміром 1200×1200 мм були виготовлені заздалегідь до випробування. Рецептuru виготовлення зразку взято з [91] з метою створення можливості порівняння отриманих результатів з опублікованими раніше.



Рисунок 3.1. Процес виготовлення фрагментів сталезалізобетонної плити

Пропорції залізобетону фрагмента: на 1 м³ – портландцемент марки «500» – 460± 10 кг; пісок кварцовий – 660 ± 10 кг; щебінь гранітний – 1150 ± 10 кг; вода. Водо-цементне (В/Ц) співвідношення: $V/C = 0,3 \times$ (вода – 138 ± 10 кг); з однаковими фракціями гранітного заповнювача (щебня) – 10–20 мм.

Складники дозовані за допомогою вагових дозаторів заводського виконання. Бетонну суміш перемішано в бетономішалці вільного падіння об'ємом 0,75 м³. Ущільнення бетонної суміші реалізоване з використанням глибинних вібраторів.

Профіль: Суцільний несучий сталевий профільний лист марки Н-114, товщиною 0,7 мм, покриття: ZN (Цинк).

Армування увідповіднене з вимогами до будівництва конструкцій гофрованих плит для адміністративних та житлових будівель. Арматура – дріт класу Вр-I діаметром 5 мм.

Конструкцію виготовлено за допомогою стандартної розбірної опалубки. Зразки перебували в опалубці протягом семи днів. Після розпалубки фрагмент і допоміжні зразки зберігалися впродовж 28 діб.

Після 28-денного витримування фрагменти зберігали в нормальних умовах температури й вологості до початку випробувань.

На рис. 3.2 подано фото заздалегідь підготовленого фрагмента, зразка № 1, для натурного випробування з вогнестійкості.



Рисунок 3.2. Фрагмент сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем, виготовленої заздалегідь до випробування: 1 – огороження вогневої печі; 2 – фрагмент стале залізобетонної плити для випробування.

Зразки зберігалися в закритому приміщенні, потім їх транспортували до місця випробувань і встановлювали у вогневу піч.

Нормативна база. Для випробувань використано метод, що увідповіднений із нормативними документами, представленими в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Керівні документи

ДСТУ EN 1363-1:2023	Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT) Загальні вимоги [26].
ДБН В.2.6-160:2010	Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення [92].
ДСТУ EN 1365-2:2023	Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 2. Перекриття та покриття (EN 1365-2:2014, IDT) [28].
ДСТУ 2272:2006	Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять [93].
НАПБ А.01.001-2014	Правила пожежної безпеки в Україні [94].
ДБН В.2.6-98:2009	Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [95].
ДБН В. 1.1.7-2016	Пожежна безпека об'єктів будівництва [27].

Метою випробувань було отримання результатів температурних розподілів на поверхні та в точках інтегрування в перерізах фрагментів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем для подальшого розрахункового оцінювання їхньої межі вогнестійкості; перевірка відтворюваності експериментальних даних.

Випробування було проведено на навчальному комплексі практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧПБ ім.

Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (с. Свидівок Черкаського району Черкаської області). Зовнішні умови:

- дата проведення випробувань – 09.05.2024;
- температура повітря – $26^{+1} \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- вологість повітря – 58 %;
- вітер північний – 1-3 м/с.

3.3. Методика та засоби випробувань

Методика полягає у впливі стандартного температурного режиму пожежі за одностороннього нагрівання фрагменту сталезалізобетонної плити, зі сторони гофрованого профілю (низ плити). На основі отриманих даних розрахунковим способом провести оцінку межі вогнестійкості повнорозмірної конструкції під навантаженням [26].

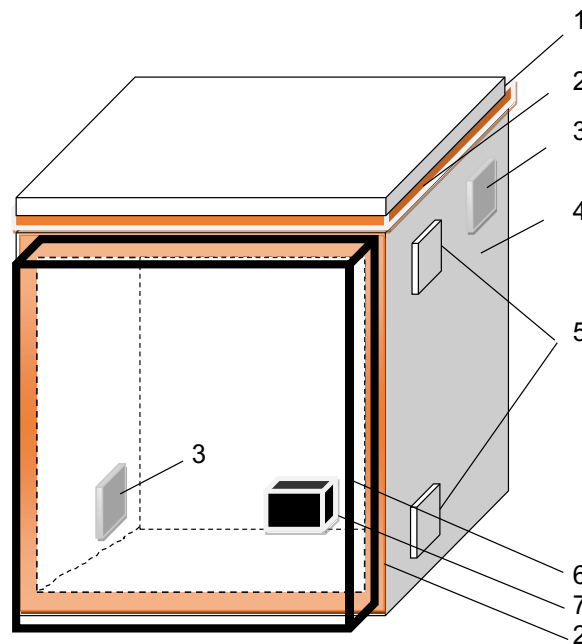


Рисунок 3.3. Схема встановлення зразка для випробувань: 1 – кришка, що закриває верхню частину установки; 2 – ущільнювач із мінеральної вати й вапняного шнура; 3 – пальники, що створюють температурний режим у камері печі; 4 – огороження печі; 5 – місця для пальників, що не використовують під час

вогневих випробувань; 6 – досліджуваний зразок; 7 – отвір виходу продуктів горіння.

До початку випробування зафіксовано дату проведення дослідження, температуру навколишнього повітря, вологість повітря, силу й напрям вітру (п. 3.2). Перед початком замірено габаритні розміри зразка, товщину зразка. Зафіксовано встановлені дані. Виготовлено три зразки:

- зразок 1 – 1192×1196 мм;
- зразок 2 – 1196×1194 мм;
- зразок 3 – 1197×1199 мм.

Фрагмент було закріплено в передній частині установки. Верхня частина установки закрита кришкою. Для щільності прилягання використано мінеральну вату й вапняний шнур. На рис. 3.3 зображено схему встановлення зразка для випробувань.

У процесі випробування фрагменту використано два пальники, що розташовані зверху та знизу дальньої частини установки. Факели полум'я розміщені на відстані 80 см до випробувального зразка (рис. 3.3). На час випробувань фрагментів місця для пальників, які не використовували, закладені цеглою і мінеральною ватою для запобігання виходу пічних газів через отвори.

До початку випробувань встановлено термопари в просторі камери вогневої печі та на зразку:

- у камері вогневої печі розташовані три термопари типу ТХА для контролю температурного режиму та його увідповіднення зі стандартним;
- на обігрівальній поверхні зразка та на рівні арматури по 5 термодатчиків (рис. 3.4);
- на необігрівальній поверхні 5 терморезисторів із діапазоном замірювання $0 - 300$ °С.

Відповідно до розроблених методик [26], засоби вимірювальної техніки, мають бути встановлені до випробувань. Особливістю одностороннього обігріву є те, що необхідно враховувати всі три показники вогнестійкості.

Тому необхідно замірювати температуру на необігрівальній стороні щонайменше у п'яти розосереджених місцях.

Щодо цілісності. У випадку випробування фрагментів можливе проведення візуального спостереження, тому при будь-яких тріщинах на поверхні доцільним є вважати, що вона порушена.

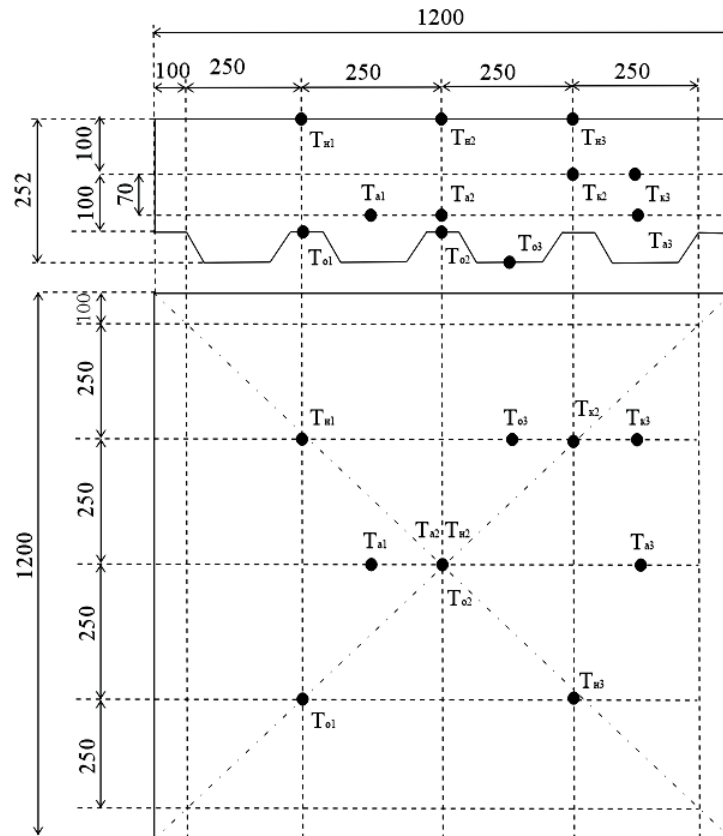


Рисунок 3.4. Схема розташування засобів вимірювальної техніки в перерізі фрагменту для випробувань (обґрунтування позначень приведено нижче).

Згідно з рис. 3. 4, засоби вимірювальної техніки, встановлені до випробувань, розташовані та пронумеровані так: на обігрівній поверхні зразка – термопари T_{o1} – T_{o3} ; на необігрівній поверхні – термістори T_{n1} – T_{n3} ; на рівні арматури (0,03 м від поверхні) – термопари T_{a1} – T_{a3} ; контрольні точки замірювання (на середній лінії перерізу плити) – термістори T_{k2} – T_{k3} .

У табл. 3.2 систематизовано використані під час натурного експерименту засоби вимірювальної техніки [26].

Таблиця 3.2

Засоби виміральної техніки

№ з/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1	2	3	4	5
1	Лінійка вимірвальна	-	від 0 мм до 1000 мм	± 1 мм
2	Секундомір СОС пр-26-2-000	3401	від 0 с до 60 с, від 0 с до 60 хв	$\pm \left(\frac{0,4}{60} \tau \right)$ $\pm (0,4 + \frac{1,5}{3540} (\tau - 60))$
3	Психрометр аспіраційний МВ-4М	14689	від 10 % до 100 % від -10°C до 50°C	± 4 % ± 0,2 °C
4	Штангенциркуль ІЦЦ-1	3339340	від 0 мм до 125 мм	± 0,1 мм
5	Барометр-анероїд М67	797	600 - 800 мм рт.ст.	± 1 мм рт.ст.
7	Анемометр АСО-3	12952	від 0,3 м/с до 5 м/с	± (0,1+0,05V) м/с
8	Ваги MW-1200	990208057	від 0 кг до 1,2 кг	± 0,05 г
9	Термопара ТХА-2388*	2388 з модулем АЦП	від -200 до +700 °C від +700 до +1350°C	± 2,0 °C ± 4,0 °C
10	Термістор*	MF 52	від - 30 до +300°C	± 1,0 %

* – термопари ТХА – 6 шт., термістори – 5 шт.

Для фіксування температури в печі застосовано термопари ТХА-2388 із діаметром дроту 1,25 мм (рис. 3.5). Їх можна використовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300 С [26].

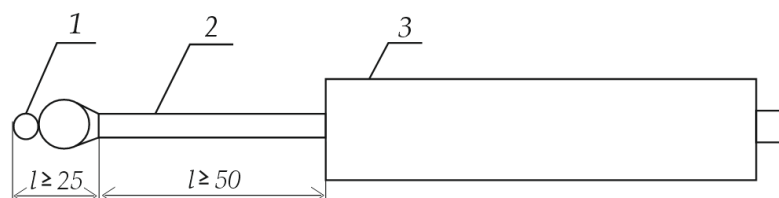


Рисунок 3.5. Схема термопар для вимірювання температур у робочому просторі печі: 1 – вимірвальний спай; 2 – захисний кожух; 3 – теплозахисна оболонка [26].

Для вимірювання температури в досліджуваному зразку використано термістори, придатні для вимірювання і температури в діапазоні від -30 до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.6).



Рисунок 3.6. Термістор MF 52 [26].

Усі аналогово-цифрові перетворювачі сигналу термопар і термісторів розташовані в блоці комбінованого обчислення температур (рис. 3.7).

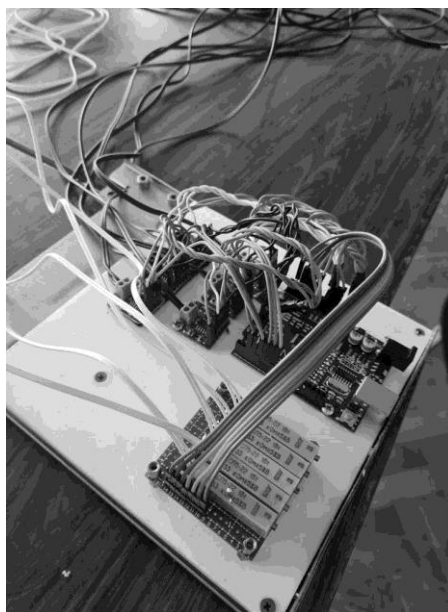


Рисунок 3.7. Блок комбінованого обчислення температур [29].

Принципову схему блок комбінованого обчислення температур представлено на рис. 3.8.



Рисунок 3.8. Принципова схема блоку комбінованого обчислення температур.

Для фіксування цифрових показників температури в місцях установки термопар використано модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопар на основі мікросхеми max. 31855, що дає змогу перетворювати аналоговий цифровий сигнал термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °C. Модуль передає сигнал на платформу Ардуїно через цифровий вхід. Сигнал від термісторів надходить на аналоговий вхід та паралельно з сигналом від термопар опрацьовується мікропроцесором Ардуїно.

Зображений на рис. 3.7, блок комбінованого обчислення температур спеціально для створеної малогабаритної установки розроблено у ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, допомагає вимірювати температуру з чутливістю 0,25 °C. Цей пристрій зважає на температуру холодних спаїв та автоматично корегує значення температури.

Для опрацювання отриманих відомостей використано плагін «PLX DAQ» для «Microsoft Excel», що дає змогу в реальному часі фіксувати значення температури й будувати графіки.

3.4. Проведення випробувань та їхні результати

Під час випробувань проведено фотофіксацію і відеофіксацію експерименту.



Рисунок 3.9. Вигляд вогневої печі перед початком випробування.

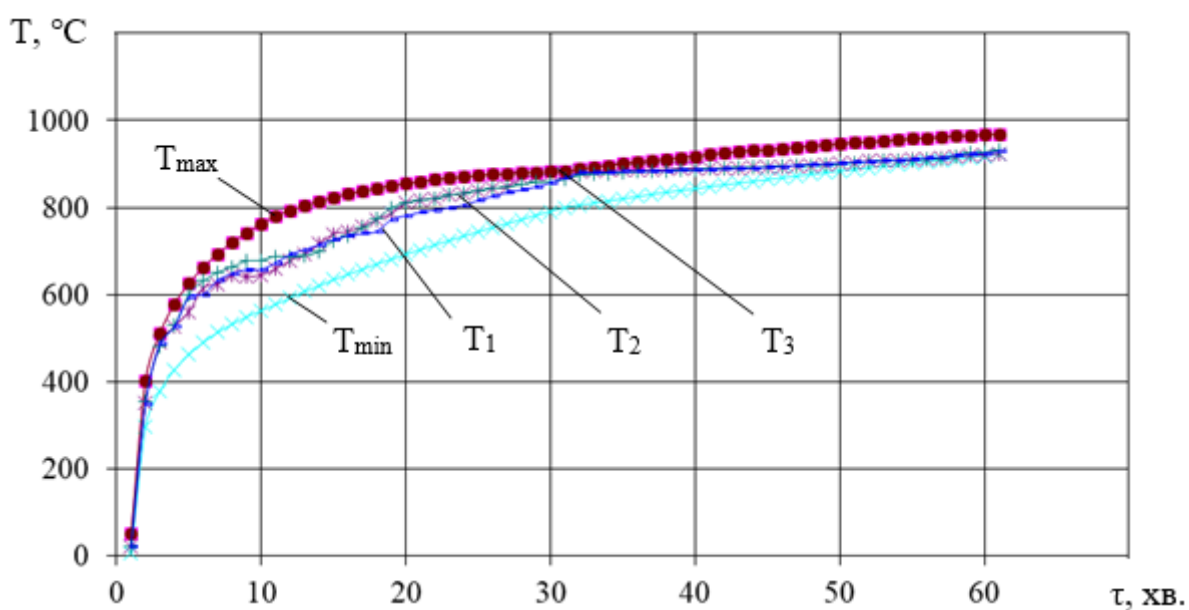


Рисунок 3.10. Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час нагрівання фрагменту: $T_{\min}$, $T_{\max}$ – граничні межі випробувань за стандартним температурним режимом пожежі [26]; T_{k1} , T_{k2} , T_{k3} – показники термопар у ході вогневих випробувань.

Як засвідчують дані прогріву термопар (рис. 3.10), лінійна швидкість нагрівання камери печі увідповіднена зі «стандартною» температурною кривою пожежі, перебуває в стандартних межах [26]. За досягнення 940 С встановлено стаціонарний режим, із використанням регулювання потужності нагрівання печі. Тривалість випробування – 63 хвилини.

На рисунку 3.11 продемонстровано досліджуваний зразок на 30 хвилині випробувань.



Рисунок 3.11. Малогабаритний фрагмент після випробування.

Згідно з рисунком 5.9, під час нагрівання залізобетону розпочався процес деструкції з виділенням вологи й пари, які перебували всередині.

Дослідження обмежені 60 хвилинами, оскільки далі температурний режим здатний наблизитися до стаціонарного.

Унаслідок візуального огляду, зафіксовано, що не відбулося втрати цілісності, теплоізоляційної та несучої здатності зразка.

На рисунках 3.12 – 3.15 відображено результати показників термопар на обігрівальній, необігрівальній поверхні та на рівні арматури.

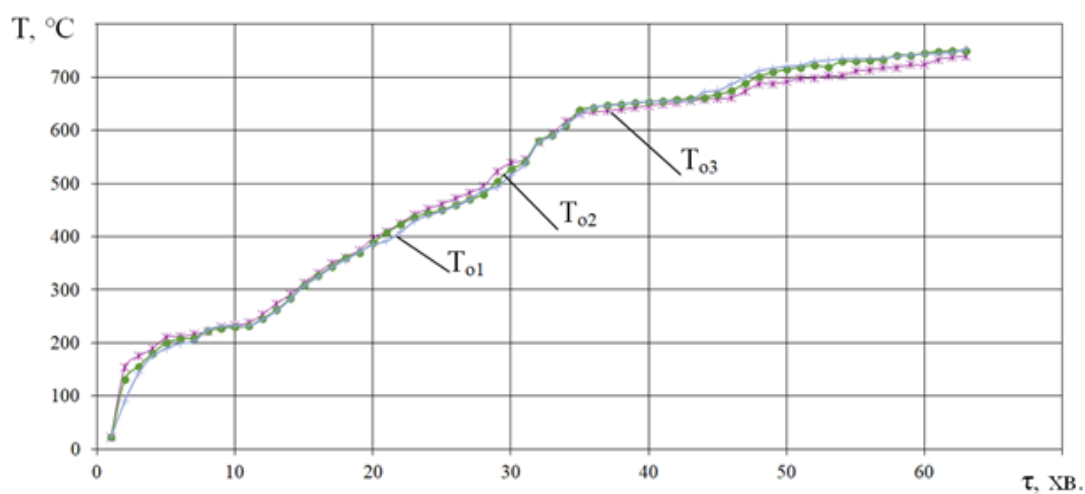


Рисунок 3.12. Результати вимірювання температури на обігрівальній поверхні досліджуваного зразка: T_{o1} – T_{o3} – показники термопар (рис. 3.4).

]

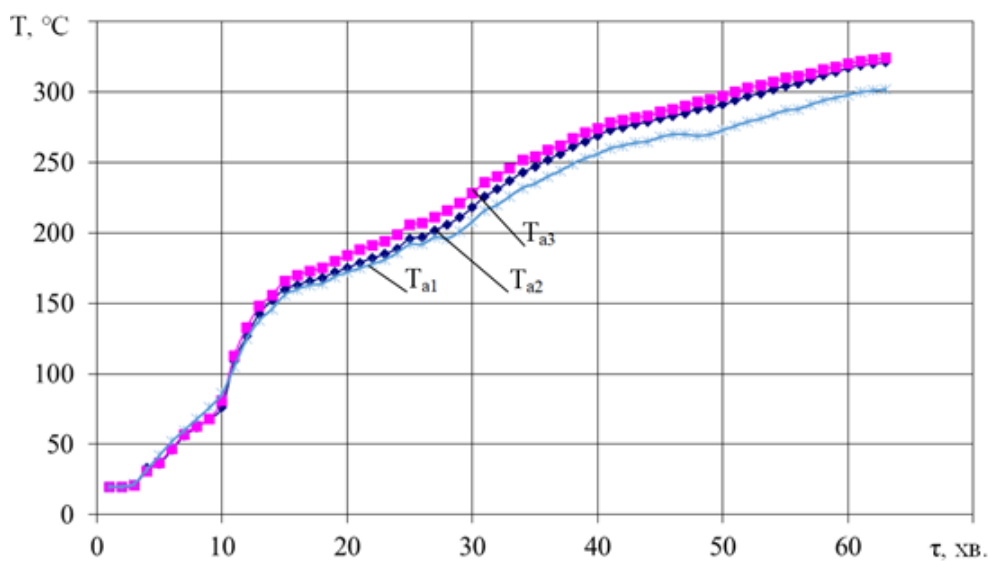


Рисунок 3.13. Результати вимірювання температури на рівні арматури досліджуваного зразка: T_{a1} – T_{a3} – показники термопар (рис. 3.4).

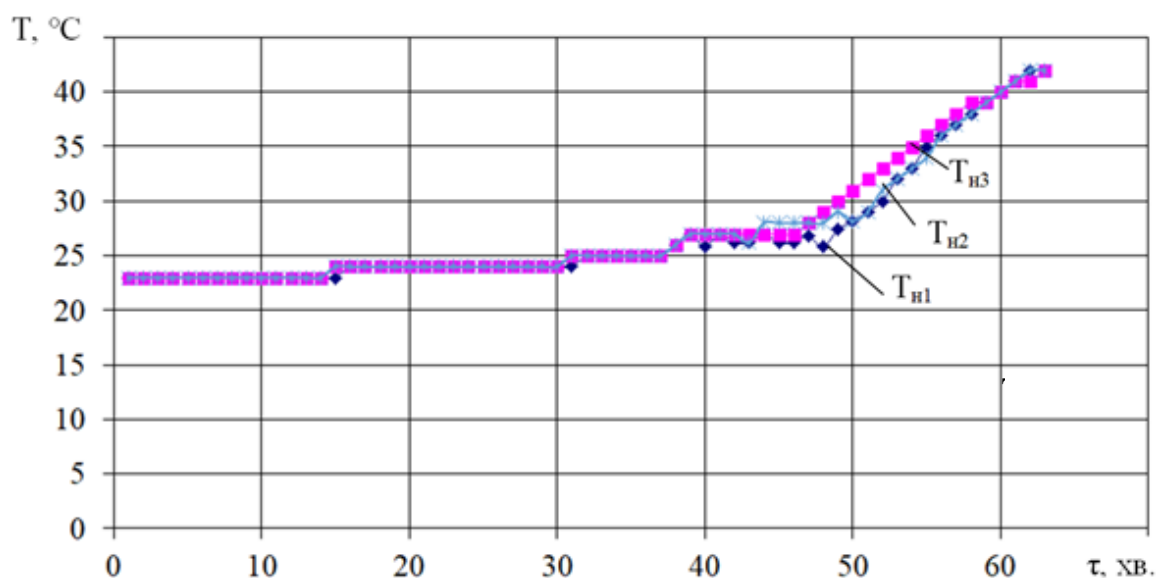


Рисунок 3.14. Результати вимірювання температури на необігрівальній поверхні досліджуваного зразка: $T_{н1}$ - $T_{н3}$ – показники термопар (рис. 3.4).

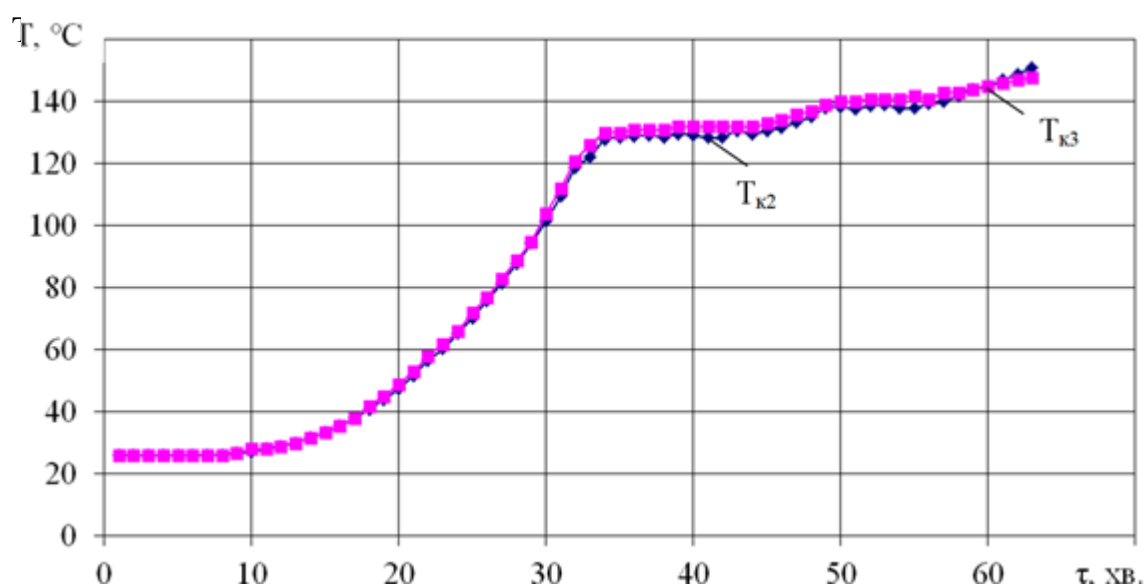


Рисунок 3.15. Результати вимірювання температури у контрольних точках (серединний переріз): $T_{к2}$, $T_{к3}$ – показники термопар (рис. 3.4).

На підставі аналізу даних, отриманих за результатами експериментів (рис. 3.12 – 3.15), зроблено висновки:

– два газові пальники можуть увідповіднити температурний режим у камері печі зі «стандартним» [29];

- під час нагрівання залізобетону зафіксовано виділення пари, що були всередині матеріалу: на обігрівальній поверхні процес відбувався з 7 до 12 хвилини (рис. 3.12), на рівні арматури – з 20 до 28 хвилини (рис. 3.13); у контрольних точках – з 32 до 46 хвилини (рис. 3.15).

- виявлено рівномірний прогрів конструкції на всіх рівнях у площинах розміщення термопар (рис. 3.12– 3.15);

- максимальна температура на рівні арматури становила 350°C , була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато;

- максимальна температура на необігрівальній поверхні дорівнювала 45°C , була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала;

- максимальна температура у контрольних точках становила 145°C , була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато;

- потрібно верифікувати експериментальні дані для підтвердження їхньої достовірності;

- отриманих експериментальних даних достатньо для подальшого розрахунку температурних полів усередині конструкції та оцінювання вогнестійкості конструкцій.

Для оцінки адекватності результатів експериментів було здійснено верифікацію в контрольних точках згідно з рекомендаціями досліджень [23, 29]. Такий підхід дозволяє забезпечити достовірність і повторюваність отриманих даних, що є ключовим аспектом при наукових дослідженнях. Контрольні точки слугували еталонними значеннями для порівняння, що дає змогу виявити можливі відхилення та уточнити моделі чи методики. Загалом, верифікація результатів є обов'язковим етапом при перевірці гіпотез і гарантує надійність висновків, зроблених у процесі експерименту.

Узагальнені результати розрахунків критеріїв адекватності наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Кількісні показники дисперсії результатів вогневих випробувань відповідно до результатів проведених експериментів

Термопара термістор (рис. 3.4)	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит.	t-критерій	Критичне значення t-крит.	Q-критерій	Критичне значення Q-крит.
T _{к2}	17,6	6,9	2,8	1,26	4,49	1,19	2,92	0,07	0,45
T _{к3}	22,6	9,2	4,1	1,42		1,36		0,13	

Як показано в табл. 3.3, відносне відхилення становить не більше 4,1 %, а обчислені критерії адекватності (Фішера, Стюдента та Кохрена) є нижчими за критичні значення, що підтверджує достовірність експериментальних даних.

3.5. Висновок до розділу 3

1. У даному розділі було розроблено, обґрунтовано та вперше реалізовано експериментальну методику вогневих випробувань фрагментів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем у малогабаритній вогневій печі. Суть експериментів полягала у впливі стандартного температурного режиму пожежі на фрагменти номінальним розміром 1200×1200 мм за допомогою малогабаритної вогневої установки. Це дозволяє досліджувати тепловий вплив на будівельні конструкції без додаткового механічного навантаження, забезпечуючи одностороннє нагрівання. Було описано засоби вимірювальної техніки та особливості їхнього розміщення. З метою контролю температури в камері вогневої печі було використано термопари ТХА-2388, що забезпечують вимірювання у діапазоні від 0 до 1300 °С. Для температурних вимірювань усередині досліджуваного зразка використовувалися терморезистори MF 52, які функціонують у межах від -30 до 300 °С.

2. Проаналізовано результати експериментів. Відбувався рівномірний розподіл температури на обігрівній поверхні досліджуваного фрагмента, де максимальна температура досягла 760 °С. Температура у контрольних точках

склала 145 °С, на необігрівній поверхні – 45 °С, а на рівні арматури – 350 °С. Ці показники спостерігалися на останній хвилині експерименту та продовжували лінійно зростати.

3. Проведено верифікацію результатів, що показала високу повторюваність: середнє відхилення температур у контрольних точках не перевищувало 9,2 °С, а відносне відхилення не перевищило 4,1 %. Адекватність експериментальних даних була підтверджена методами математичної статистики: розраховані критерії адекватності (Фішера, Стюдента та Кохрена) не перевищили критичних значень, що відповідає вимогам до точності. Це дозволяє використовувати отримані дані для подальшого моделювання температурного поля всередині плити, що відкриває перспективи для наступних досліджень у рамках цієї роботи.

4. Обґрунтовано мінімально допустимі геометричні параметри вогневої установки, яка забезпечує відтворюваність температурного поля, характерного для стандартного пожежного впливу, що дозволило зменшити кількість засобів вимірювальних приладів в експериментальних дослідженнях із нагрівання сталезалізобетонних плит на 33 % за рахунок удосконалення експериментального обладнання: оптимального розташування пальників (на відстані 80 см з діаметром сопел до 76 мм) і розміщення термопар згідно з принципами глибини та симетрії.

РОЗДІЛ 4.

ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНЬ РОЗРАХУНКУ З ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ З ГОФРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1. Відтворення експерименту з нагрівання сталезалізобетонної плити у програмному комплексі CFD

Одним із ключових завдань при проектуванні будівель є забезпечення належного рівня пожежної безпеки та вогнестійкості будівельних конструкцій, що має відповідати вимогам чинних нормативних документів з пожежної безпеки. Межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій, як правило, визначаються за результатами випробувань, проведених за стандартною методикою у спеціалізованих вогневих установках. Проте існуючі норми, методи випробувань, а також самі конструкції не позбавлені недоліків і потребують удосконалення. Крім того, постійно розвиваються підходи до будівництва, матеріали та типи конструкцій. Зокрема, в умовах сучасного будівництва широко застосовуються монолітні технології, а для влаштування перекриттів громадських будівель усе більшого поширення набувають сталезалізобетонні плити з гофрованим профілем. Такі плити мають високу міцність і не потребують додаткової дерев'яної опалубки. Водночас досліджень щодо вогнестійкості цих елементів недостатньо, що може призвести до помилкової оцінки межі їх вогнестійкості та створити загрозу для безпечної евакуації людей у разі передчасного руйнування перекриття в умовах пожежі.

Для вирішення цієї проблеми доцільно застосовувати методи експериментального дослідження з використанням вогневих установок, а також комп'ютерне моделювання. У даній роботі було змодельовано процес прогрівання камери малогабаритної печі під час нагрівання сталезалізобетонної плити та

виконано аналіз адекватності розрахункового експерименту на основі результатів натурних досліджень.

Оцінювання вогнестійкості перекриттів регламентується чинними нормативними документами [26–28], згідно з якими допускається проведення випробувань без прикладання механічного навантаження у випадках, коли технічно неможливо його забезпечити. У стандартах дозволяється випробовувати як фрагменти конструкцій, так і повнорозмірні зразки. Однак дослідження нестандартних та великогабаритних елементів є складним і затратним процесом через потребу у великих фінансових ресурсах та трудових витратах, а також обмеження габаритів печей, які не завжди відповідають розмірам досліджуваних зразків. Додатково ці процеси мають низьку екологічність.

У працях [23–24] запропоновано підхід до випробування малогабаритних елементів залізобетонних конструкцій у малогабаритних вогневих печах із дотриманням стандартного температурного режиму пожежі та описано процедуру верифікації експериментальних результатів. Виходячи з цього, існує можливість дослідити вплив пожежного навантаження на сталезалізобетонні плити з гофрованим профілем на основі результатів натурних випробувань.

У роботі [23] було запропоновано ефективний підхід до застосування експериментально-розрахункового методу для оцінки вогнестійкості різних типів будівельних конструкцій. Разом з тим у праці [29] зазначено, що точність результатів можна підвищити за рахунок більш раціонального розміщення засобів вимірювання. Дослідження [87–89] акцентують увагу на особливостях монолітних сталезалізобетонних конструкцій, пов'язаних із характером навантаження та поведінкою матеріалу під впливом високих температур. Через неоднорідність матеріалу процес теплопередачі в ньому ускладнюється, тому рекомендовано враховувати цей чинник на етапі експериментальних досліджень. У роботі [96] розглянуто вплив параметрів вогневих печей на умови нагрівання несучих стін за стандартним температурним режимом, показано, що малогабаритна піч здатна забезпечити рівномірне прогрівання плоских поверхонь.

У даній роботі було змодельовано експеримент із нагрівання сталезалізобетонного фрагменту з гофрованим профілем у малогабаритній печі [4] за допомогою комп'ютерної газогідродинамічної моделі (CFD). Результати натурних випробувань слугували основою для верифікації отриманих під час моделювання даних.

Згідно з дослідженням [23], у випадку плоских залізобетонних плит розташування зразка у печі не впливає на результати нагрівання, оскільки малогабаритна установка забезпечує однакову рівномірність теплового впливу на вертикальні й горизонтальні поверхні з одностороннім обігрівом за відсутності механічного навантаження. Проте для плит з гофрованим профілем така гіпотеза ще не була перевірена. Відповідна оцінка буде виконана в розділі 4.2.

У цьому ж розділі відтворено умови експерименту, описаного в розділі 3. Ціль нагрівання – розв'язання теплотехнічної задачі щодо прогрівання матеріалу конструкції, тому зразок плити було розміщено вертикально під час експерименту [4], що враховано і в процесі моделювання.

Особливості побудови моделі нагрівання фрагмента перекриття детально наведені в розділі 2.5. Згідно з наведеним алгоритмом було відтворено умови реального експерименту у програмному середовищі. Температурний режим пожежі при моделюванні відповідав стандартному [26]; для цього інтенсивність подачі горючої речовини коригувалася відповідно до заданої температурної кривої.

Для перевірки достовірності та адекватності результатів використано методи математичної статистики з урахуванням експериментальних і розрахункових даних. У комп'ютерній моделі було відтворено процес натурних випробувань. Параметри печі, зразка та розташування контрольних точок вимірювання температури відповідали реальним умовам, описаним у розділах 3.2 та 3.3. Параметри моделі були задані відповідно до алгоритму, наведеного в розділі 2.4.

У ході дослідження контролювалася температура в камері печі та на нагрівальній поверхні несучої частини плити; результати наведено у вигляді графіків на рис. 4.1–4.2.

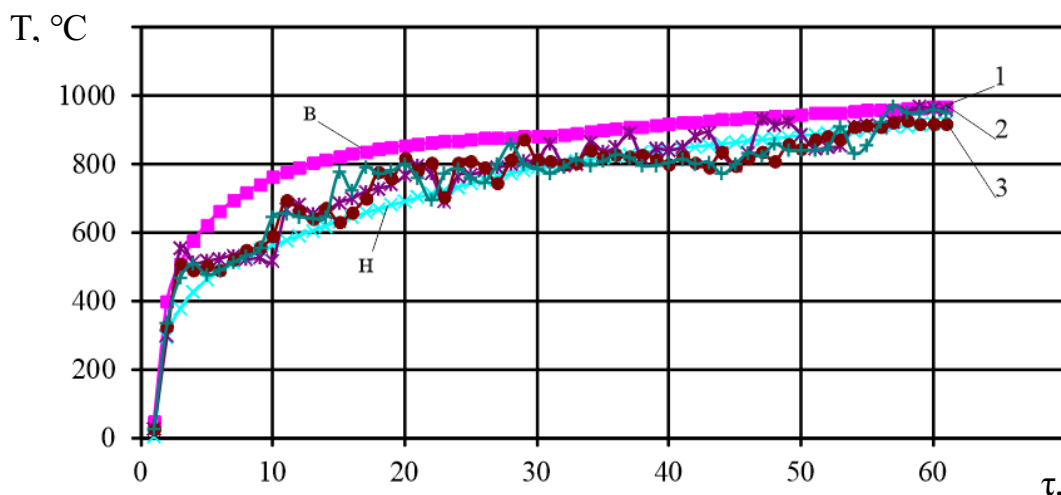


Рисунок 4.1. Температурний режим у камері печі під час моделювання: в, н – верхня та нижня межі допустимого діапазону; 1–3 – середні значення температури в окремих зонах камери.

Відповідно до отриманих результатів (рис. 4.1), середня температура в камері вогневої печі перебувала в межах, що відповідають стандартному температурному режиму пожежі. Контрольні точки, розташовані в нижній частині камери, а також у зонах, віддалених від пальників, зафіксували температуру, яка була на 5 % нижчою порівняно з протилежними ділянками.

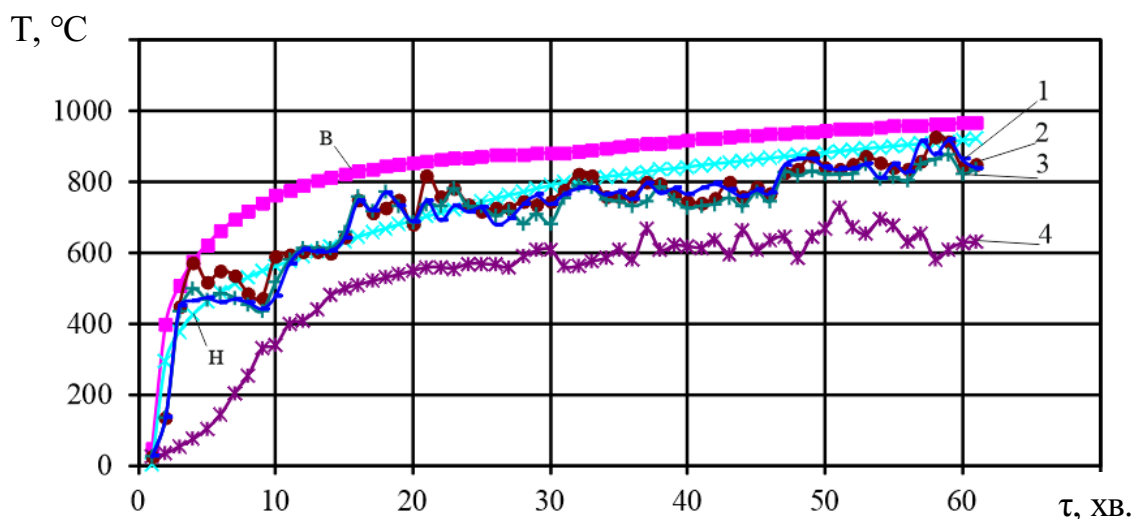


Рисунок 4.2. Температурний режим на поверхні гофрованого профілю: в, н – верхня та нижня межі допустимого діапазону; 1 – середня температура у верхній

частині поверхні сталевго профілю; 2 – середня температура у центральній частині поверхні сталевго профілю; 3 – середня температура у нижній частині поверхні сталевго профілю; 4 – температура шару бетону, що прилягає до профілю.

Відповідно до отриманих результатів (рис. 4.2), зовнішня поверхня гофрованого сталевго профілю прогрівалася відносно рівномірно. Дещо вища температура спостерігалася на плоских ділянках, тоді як на згинах вона була нижчою – до 5 %. Це можна пояснити із застосуванням закону Ламберта, який враховує взаємне розташування джерела тепла та нагрівальної поверхні.

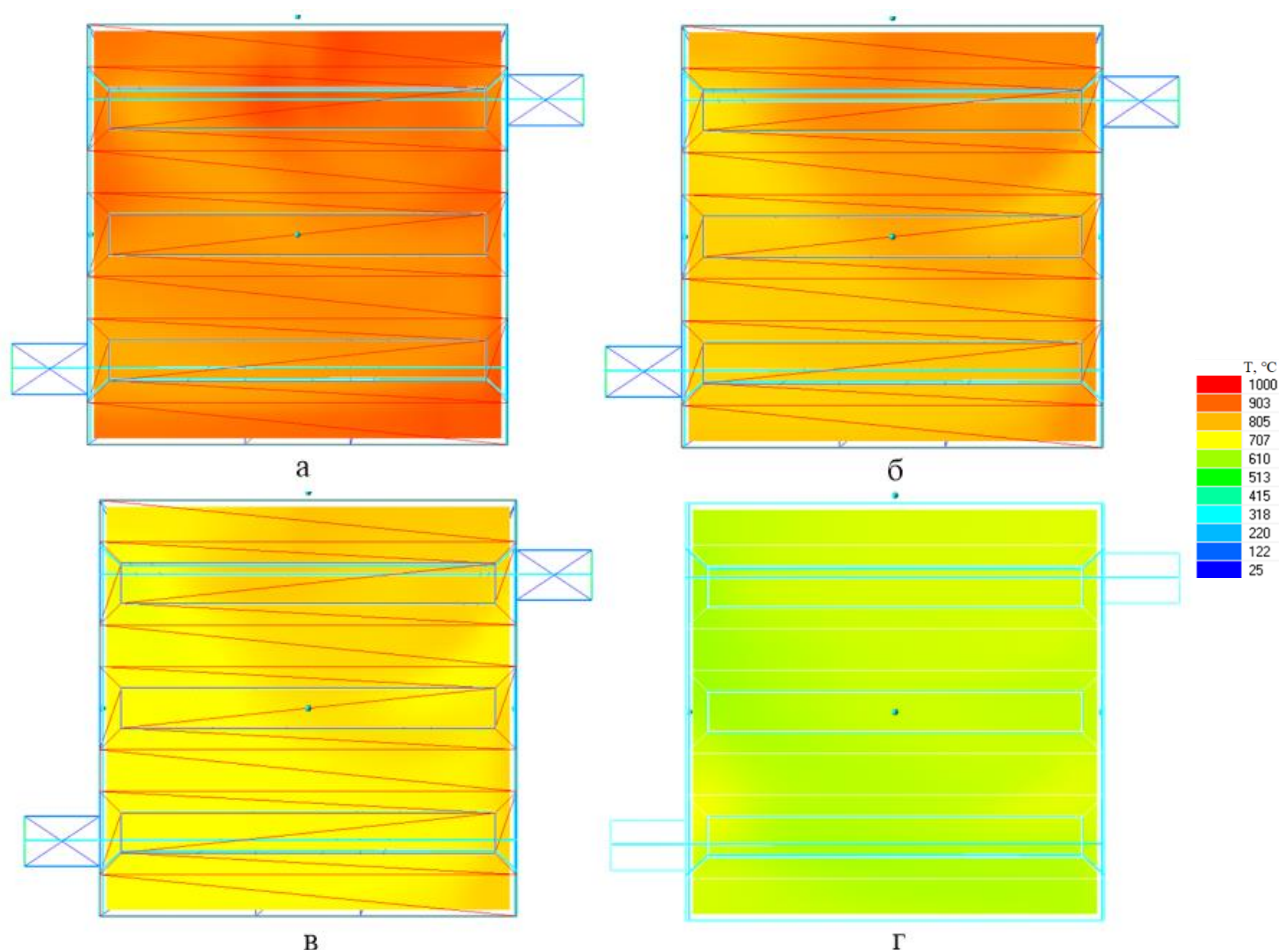


Рисунок 4.3. Градієнт температур на нагрівальній поверхні фрагмента сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем у різні моменти часу нагрівання: а – 60 хвилина; б – 45 хвилина; в – 30 хвилина; г – 10 хвилина.

Крива 4 на рис. 4.2 відображає температуру шару бетону, прилеглого до сталевого профілю. Розрахункові можливості програмного комплексу дозволяють здійснювати подібні обчислення, однак їх точність є обмеженою, тому ці дані наведено лише для загального уявлення. Застосовувати їх для подальших інженерних розрахунків недоцільно. Водночас отримані значення свідчать про правильність роботи побудованої моделі.

На рис. 4.3 наведено розподіл температур на поверхні фрагмента сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем у різні моменти нагрівання, що відображено за допомогою кольорової заливки (температурного градієнта).

Відповідно до результатів контролю температури на нагрівальній поверхні сталевого профілю, а також даних температурного розподілу, наведених на рис. 4.3, і графічних залежностей із рис. 4.1–4.2, можна зробити такі висновки:

- температурний вплив пожежі на нагрівальну поверхню несучої частини плити, змодельований засобами комп'ютерної газогідродинаміки, а також динаміка зростання температури в камері печі відповідали стандартній температурній кривій пожежі (рис. 4.1);
- максимальна температура на нагрівальній поверхні плити на завершальному етапі моделювання досягала 840 °С, при цьому середнє значення температури по всій поверхні конструкції становило 820 °С (рис. 4.2);
- температурний розподіл на поверхні конструкції був рівномірним, відхилення між окремими зонами не перевищувало 5 % (рис. 4.1–4.2).

Окрім того, проведено зіставлення результатів комп'ютерного моделювання температурного режиму в камері вогневої печі з результатами експериментальних досліджень, виконаних на аналогічній реальній установці [4]. Відповідні дані наведено на рис. 4.4.

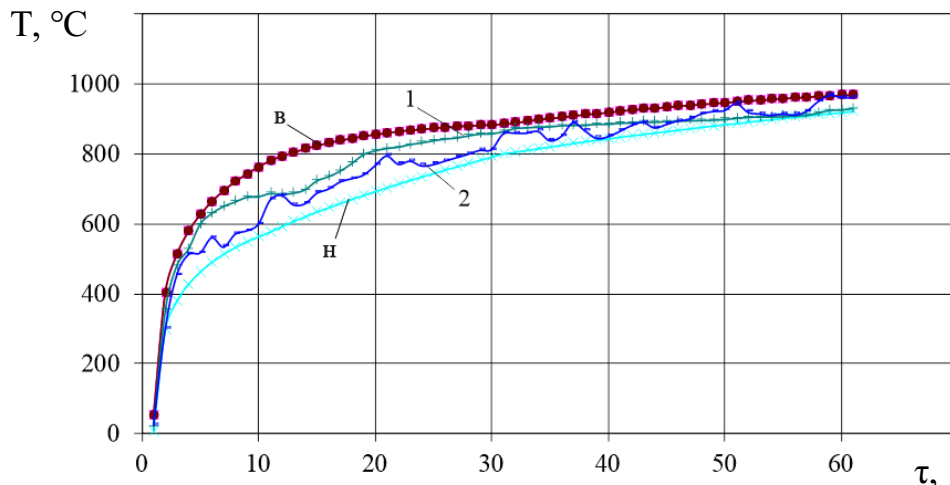


Рисунок 4.4. Середня температура під час експериментальних досліджень та моделювання: в, н – верхня та нижня межі допустимого діапазону; 1 – середня температура в камері вогневої печі під час експерименту [4]; 2 – середня температура в контрольних точках камери змодельованої печі.

Відповідно до аналізу результатів порівняння температурних режимів у камері печі під час експериментальних досліджень і моделювання (рис. 4.4), можна стверджувати про достатньо високу відтворюваність отриманих даних. Зокрема:

- в обох випадках температурний режим відповідав стандартним вимогам [26];
- під час експериментальних досліджень спостерігалася більш плавна зміна температури (крива 1 на рис. 4.4). Це пояснюється інерційністю термодатчиків, які були розміщені в металевих кожухах. Крім того, дані для побудови кривих фіксувалися на початку кожної хвилини, а не як середнє значення за інтервал часу. У свою чергу, під час моделювання на температурний розподіл значно впливав турбулентний потік;
- висока збіжність результатів дозволяє зробити висновок, що розподіл температур на поверхні гофрованого профілю в реальному експерименті відповідав змодельованому і був рівномірним.

Таким чином, аналіз впливу конфігурації малогабаритної вогневої установки на рівномірність нагрівання поверхні сталезалізобетонної плити, а також

порівняння експериментальних і розрахункових даних дозволяє сформулювати такі висновки:

- математичний апарат застосованого програмного комплексу забезпечує достатню якість відтворення процесу прогрівання внутрішнього простору камери вогневої печі, відповідає стандартному температурному режиму пожежі та дозволяє досліджувати тепловий вплив на нерівномірні обігрівальні поверхні будівельних конструкцій;

- зовнішня поверхня гофрованого сталевго профілю сталезалізобетонної конструкції прогрівалася відносно рівномірно. Вищі температурні значення зафіксовані на плоских ділянках, а на згинах температура була нижчою (до 5 %), що зумовлено просторовим розміщенням джерела тепла та нагрівальної поверхні;

- максимальна температура на нагрівальній поверхні конструкції на завершальному етапі моделювання сягала 840 °С, а середня температура по поверхні становила 820 °С. Температурний розподіл був рівномірним, з відхиленнями, що не перевищували 5 %;

- зіставлення температурних режимів, отриманих під час моделювання та експериментальних досліджень, свідчить про високу відтворюваність результатів. Це підтверджує коректність моделі та дозволяє зробити висновок про відповідність температурного розподілу в експерименті результатам моделювання.

4.2. Дослідження впливу орієнтації у просторі сталезалізобетонної плити під час проведення експериментальної частини загального методу

Основою та вхідними даними для цього розділу стали результати досліджень, проведених у розділі 4.1. Було змодельовано процес нагрівання фрагмента сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем у малогабаритній вогневій печі із застосуванням засобів комп'ютерної газогідродинаміки. У цьому випадку плита була орієнтована вертикально. Це викликало логічне питання щодо можливого впливу орієнтації конструкції на рівномірність прогрівання її поверхні та, відповідно, на достовірність отриманих результатів.

Згідно з даними, наведеними у [4], зовнішня поверхня гофрованого сталевго профілю в складі сталезалізобетонної конструкції прогрівалася відносно рівномірно. Вищі температурні значення спостерігались на плоских ділянках, тоді як на згинах температура була дещо нижчою. Максимальна температура на нагрівальній поверхні несучої частини конструкції досягла 840 °С, а середня температура по всій площині плити на той момент становила 820 °С. Відхилення температурних показників у різних точках поверхні не перевищували 5 %, що підтверджує рівномірність теплового впливу.

Перед початком цього дослідження було проаналізовано наукові праці, присвячені аналогічній тематиці. У роботі [97] вивчено тепловий вплив пожежі на фрагменти залізобетонних колон шляхом їх нагрівання у малогабаритній вогневій печі за стандартним температурним режимом пожежі. Було встановлено, що орієнтація зразків (вертикальна або горизонтальна) не впливає на процес нагрівання поверхні. Проте конструкції з гофрованим сталевим профілем у цій роботі не досліджувалися.

У дослідженні [98] представлено скінченно-елементну модель теплотехнічного аналізу вогнестійкої залізобетонної плити, яка потенційно може частково замінити експериментальні методи оцінювання. Однак, у моделі не було враховано вплив вибору параметрів моделювання на точність результатів.

У роботі [99] також використано скінченно-елементний підхід для аналізу теплового впливу пожежі на багатопустотне залізобетонне перекриття, однак сталезалізобетонні конструкції у цьому дослідженні не розглядалися.

Дослідження [100] зосереджене на аналізі ізоляційного ефекту взаємодії між бетонною плитою та сталевим настилом за умов пожежі. Встановлено, що під дією високих температур сталевий настил може роз'єднуватися з бетоном, утворюючи ізоляційний прошарок у вигляді повітряної щілини. Проте не було досліджено, як орієнтація конструкції у просторі впливає на цей процес під час стандартного нагрівання.

Для ширшого аналізу теплового впливу пожежі були розглянуті результати математичного моделювання, представлені в роботі [101]. У ній описано поведінку

вертикально розташованої скляної панелі під час одностороннього нагрівання за стандартною температурною кривою. Розподіл температур був рівномірним, але автори не дослідили можливі відмінності при горизонтальній орієнтації панелі.

У роботі [102] розглянуто моделювання температурного поля сталевих пластин з вогнезахисним покриттям на основі антипірену в умовах впливу вуглеводневої пожежі. Проте у цьому дослідженні не аналізувалися особливості теплового захисту залізобетонном та його взаємодія з металом.

Конструктивна схема плити, використаної для дослідження теплового впливу на горизонтально орієнтовану сталезалізобетонну плиту, представлена на рис. 4.5. Аналогічне компонування було використане і в розділі 1.

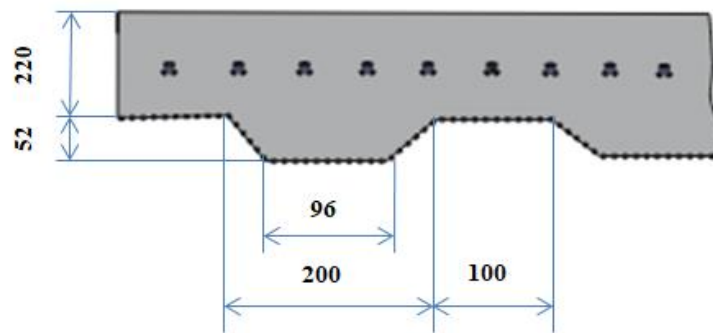


Рисунок 4.5. Конструктивна схема зразка сталезалізобетонної конструкції.

Для побудови геометричних моделей камери вогневої печі та досліджуваного зразка застосовувався CAD-програмний комплекс.

Створену 3D-модель, аналогічну до описаної в роботі [4], було імпортовано в середовище програмного комплексу CFD. Для розв'язання теплотехнічної задачі використовувалися чисельні методи, які ґрунтуються на розв'язанні системи диференціальних рівнянь суцільного середовища, зокрема рівнянь Нав'є–Стокса та рівняння теплопровідності Фур'є.

На рис. 4.6 наведено результат побудови розрахункової сітки, що застосовувалася для комп'ютерного моделювання.

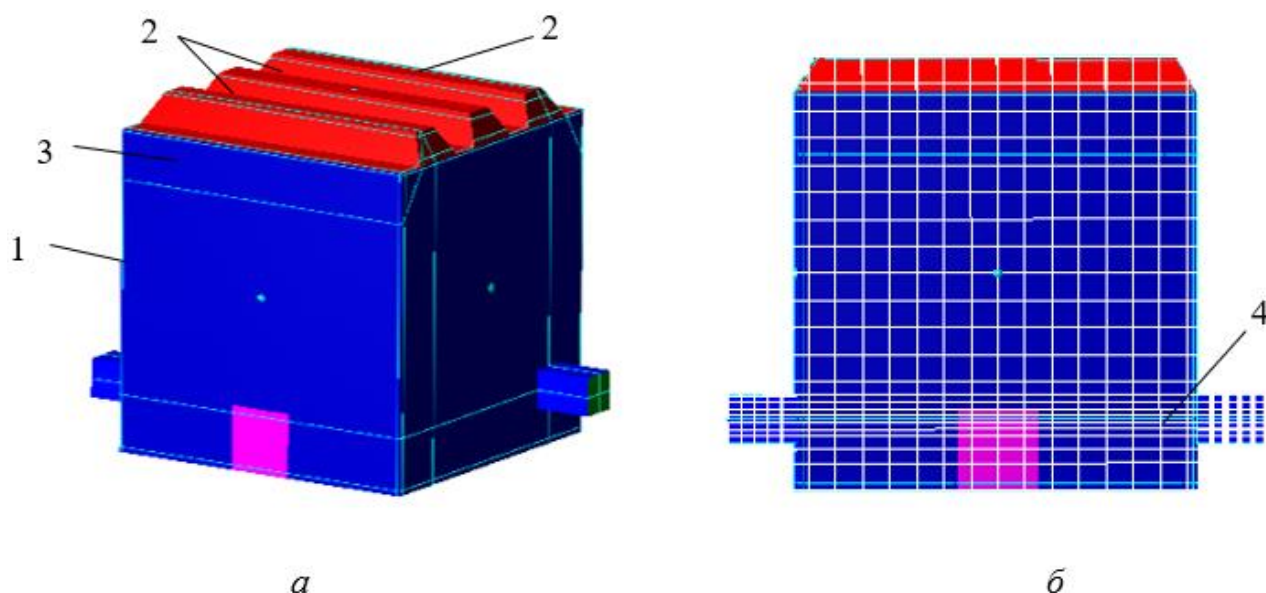


Рисунок 4.6. Зображення 3D-моделі: а – камера вогневої печі; б – розрахункова сітка моделі камери вогневої печі: 1 – камера печі; 2 – точки заміру температури поблизу поверхні гофрованого профілю; 3 – зона контролю температури в середині камери; 4 – область згущення сітки в районі розташування пальників.

Під час моделювання камери вогневої печі та сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем було створено розрахункову сітку. Розмір елементів сітки забезпечував належну точність результатів, оскільки в зонах розташування пальників передбачено її згущення, що дозволило врахувати процеси теплообміну біля поверхні твердого тіла та особливості інтенсивних турбулентних потоків у зоні горіння.

Для контролю температурних показників у досліджуваному зразку та в камері вогневої печі термопари були розташовані з урахуванням можливості дослідження температурних розподілів на необігрівній стороні гофрованого профілю сталезалізобетонної плити, а саме: на плоских ділянках гофрованого профілю – 5, на зігнутих ділянках – 4, у товщі бетонного шару, що прилягає до гофрованого профілю – 3, а також для контролю температури в камері вогневої печі – 2.

На рис. 4.7 подано візуалізацію першої хвилини розрахунку теплового потоку залежно від часу випробування.

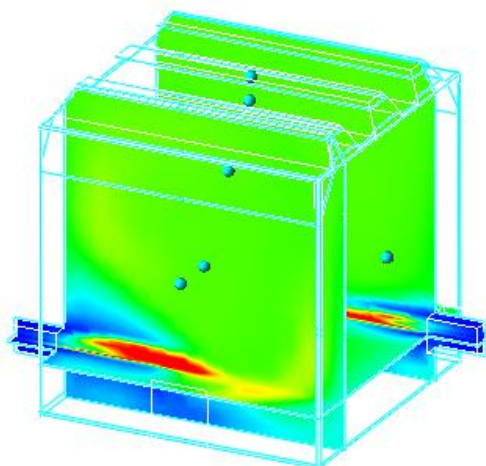


Рисунок 4.7. Візуалізація процесу теплового моделювання.

Під час розрахунку теплового потоку постійно здійснювався контроль температурних показників у контрольних точках камери печі з наступним порівнянням із кривою стандартного температурного режиму пожежі [2]. Для дотримання вимог стандарту в процесі розрахунку коригувалась інтенсивність подачі горючої речовини.

Для перевірки адекватності отриманих результатів були застосовані методи математичної статистики шляхом порівняльного аналізу розрахункових даних щодо дослідження сталезалізобетонної плити з гофрованим сталевим профілем у вертикальному та горизонтальному положеннях.

У межах комп'ютерного моделювання в середовищі CFD було використано модель пульсуючого горіння, яка є доцільною при визначенні швидкості бруто-реакції залежно від відносної дисперсії концентрації відновлених летких компонентів [103]. У процесі дослідження були отримані значення температури в камері печі (рис. 4.8) та на зовнішній поверхні гофрованого сталевого профілю горизонтально розміщеної сталезалізобетонної плити (рис. 4.9).

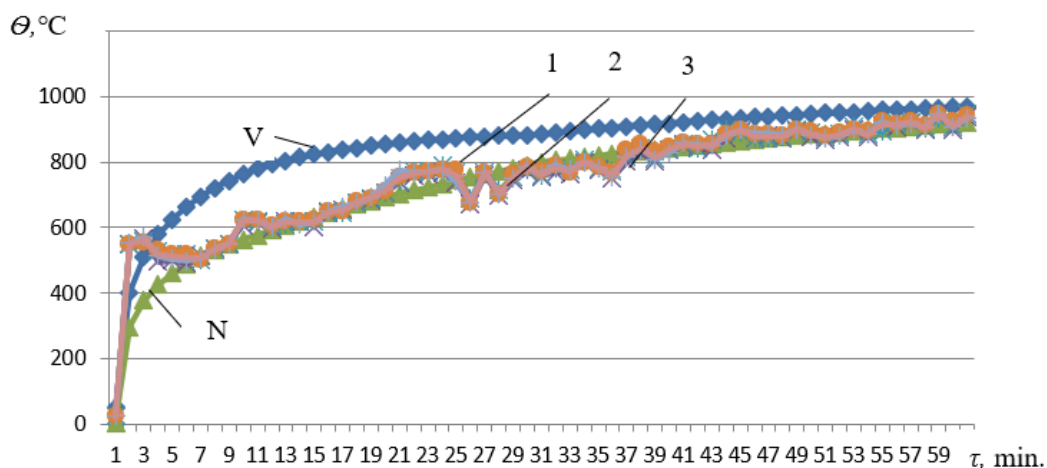


Рисунок 4.8. Температурний режим у камері вогневої печі під час комп'ютерного моделювання: 1–3 – середні температурні значення у контрольних точках камери печі; V, N – верхня та нижня межі стандартного температурного режиму пожежі.

Нагрів камери змодельованої печі здійснювався таким чином, щоб максимально точно відповідати стандартному температурному режиму пожежі [26].

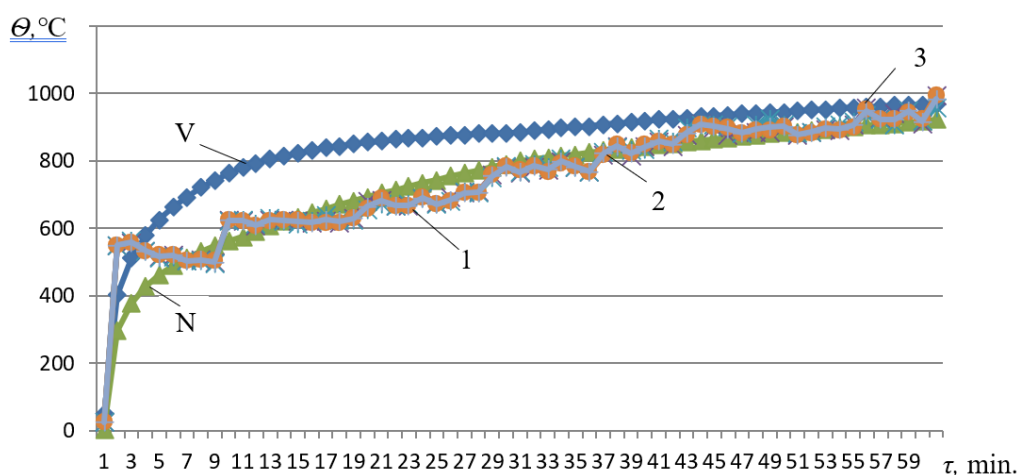


Рисунок 4.9. Дані прогрівання поверхні гофрованого профілю: 1 – середня температура у верхній частині; 2 – середня температура у середній частині; 3 – середня температура у нижній частині; V, N – верхня та нижня межі стандартного температурного режиму.

Аналіз результатів, представлених на рис. 4.9, свідчить про те, що зовнішня поверхня гофрованого сталевго профілю сталезалізобетонної плити прогривається відносно рівномірно. Температура на гладких ділянках профілю є вищою, ніж на зігнутих елементах, що пояснюється геометричними особливостями поверхні. Загальна різниця температур по поверхні гофрованого профілю становить не більше 7 %.

Отримані результати були порівняні з даними дослідження плити у вертикальному положенні (розділ 4.1). Якість та рівномірність прогрівання в обох випадках практично однакова, що свідчить про відсутність залежності ефективності теплового впливу від просторової орієнтації зразка (вертикальної або горизонтальної).

На рис. 4.10 зображено розподіл температур на поверхні зразка сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем у різні моменти часу нагрівання.

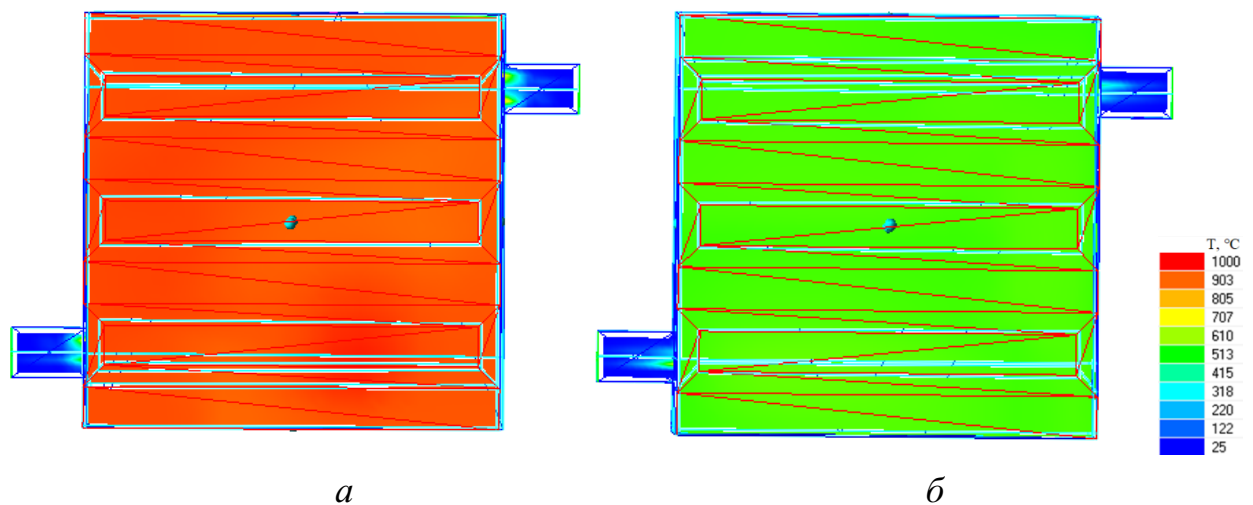


Рисунок 4.10. Розподіл температур на обігрівальній поверхні сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем у різні моменти часу нагрівання (вид згори): а – 60 хвилина; б – 10 хвилина.

Відповідно до результатів розподілу температур на обігрівальній поверхні гофрованого профілю горизонтально орієнтованої сталезалізобетонної плити, а

також температурних режимів у камері вогневої печі та на поверхні досліджуваного зразка, можна зробити такі висновки:

- температурний вплив пожежі на обігрівальну поверхню гофрованого сталевго профілю у камері вогневої печі відповідав стандартній температурній кривій пожежі (рис. 4.8);
- максимальна температура на обігрівальній поверхні гофрованого профілю на останній хвилині комп'ютерного моделювання досягла 921 °С, тоді як середня температура по всій площі конструкції становила 917 °С (рис. 4.10);
- температурний розподіл по поверхні профілю був рівномірним, із відхиленням не більше 7 % (рис. 4.8–4.9).

Для визначення оптимальної орієнтації зразка при вогневих випробуваннях проведено порівняльний аналіз температурних розподілів на зовнішній поверхні гофрованого профілю горизонтально орієнтованої сталезалізобетонної плити з результатами вертикально орієнтованої плити, наведеними у розділі 4.1.

На рисунку 4.11 представлено температурні криві, отримані в процесі моделювання елементів у горизонтальному та вертикальному положеннях [4].

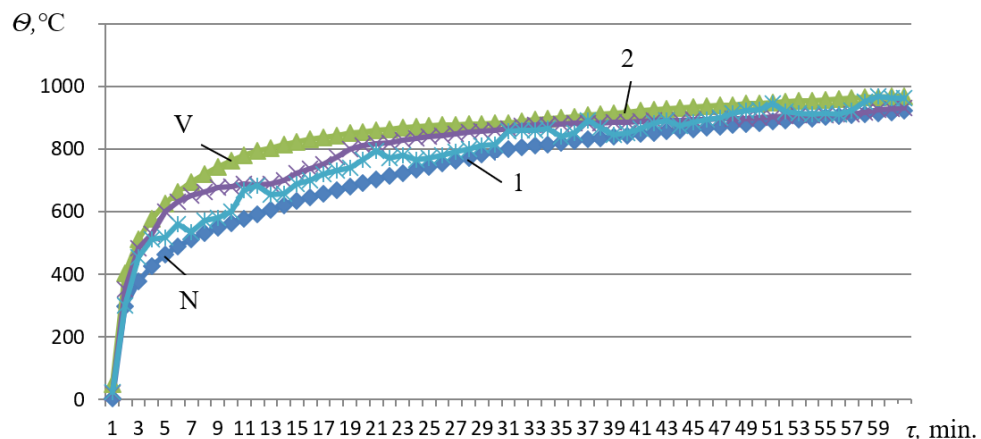


Рисунок 4.11. Середня температура у камері печі під час моделювання досліджуваних елементів горизонтального та вертикального розміщення: V, N – верхня та нижня межі стандартного температурного режиму; 1 – середня температура у камері вогневої печі під час моделювання горизонтально

розміщеного досліджуваного зразка; 2 – середня температура у камері печі під час моделювання вертикально розміщеного досліджуваного зразка.

Відповідно до результатів порівняльного аналізу температурних режимів у камері вогневої печі під час комп'ютерного моделювання сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем можна стверджувати про достовірність отриманих результатів, оскільки в обох випадках температурний режим відповідав стандартній температурній кривій, а розподіл температур у камері змодельованої печі був рівномірним (розділ 4.1).

Також проведено порівняльний аналіз середніх температур на поверхні гофрованого профілю сталезалізобетонної плити у горизонтальній та вертикальній орієнтаціях. Результати наведено на рис. 4.12.

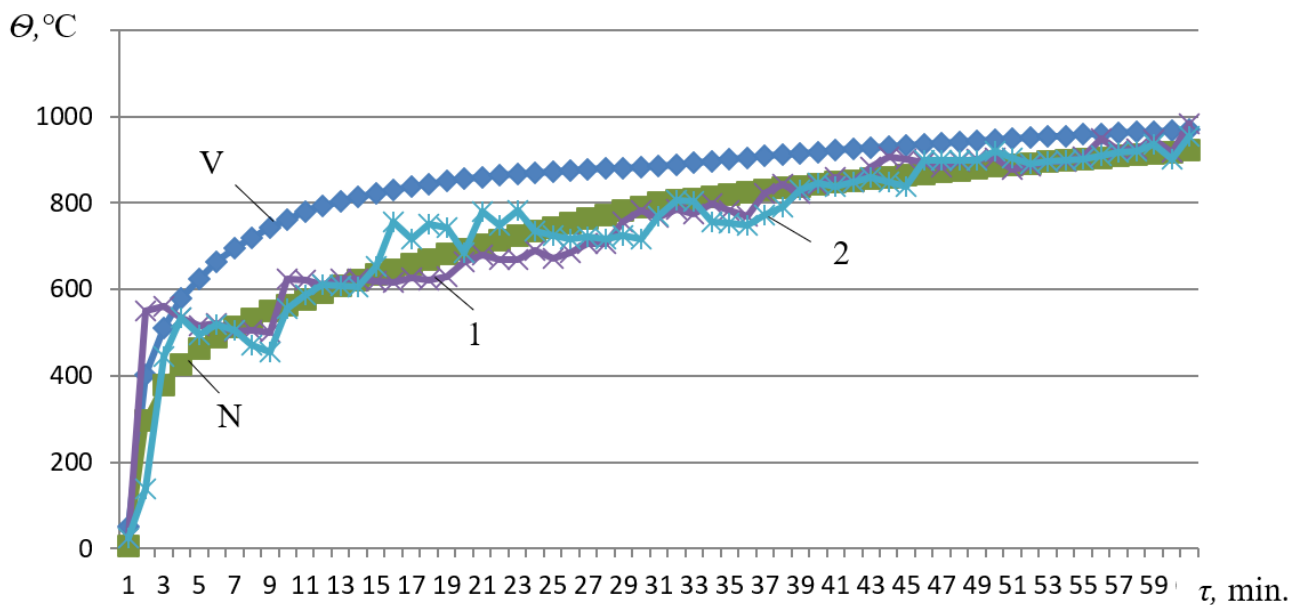


Рисунок 4.12. Середня температура поверхні гофрованого профілю сталезалізобетонної плити: V, N – верхня та нижня межі стандартного температурного режиму; 1 – середня температура поверхні гофрованого профілю горизонтально розміщеної сталезалізобетонної плити; 2 – середня температура поверхні гофрованого профілю вертикально розміщеної сталезалізобетонної плити.

Дослідження дають підстави стверджувати, що розподіл температур по поверхні гофрованого профілю є рівномірним незалежно від орієнтації у просторі.

Отримані результати демонструють хорошу відтворюваність експериментальних даних при комп'ютерному моделюванні. Таким чином, орієнтацію (вертикальну або горизонтальну) досліджуваних фрагментів сталезалізобетонних плит із гофрованим профілем під час їх нагрівання у модульній малогабаритній вогневій печі можна не враховувати [97]. За результатами аналізу отриманих даних можна зробити такі висновки:

- розподіл температур на зовнішній поверхні гофрованого профілю горизонтально орієнтованої сталезалізобетонної плити є рівномірним; відхилення температури в різних точках поверхні не перевищує 7 %. Максимальна температура на обігрівальній поверхні на завершальному етапі моделювання сягала 921 °С, середня температура по всій площині конструкції становила 917 °С;
- проведено порівняльний аналіз температурного розподілу на зовнішній поверхні горизонтально орієнтованої сталезалізобетонної плити та аналогічної плити у вертикальному положенні. Результати аналізу середніх температур поверхні гофрованого профілю в обох випадках показали рівномірність температурного розподілу, що свідчить про високу точність та надійність моделювання;
- враховуючи отримані дані, можна зробити висновок, що орієнтація досліджуваних елементів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем під час нагрівання в модульній малогабаритній вогневій печі не є критичним чинником і не впливає на результати.

4.3. Удосконалення розрахункової частини методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем

У процесі вогневих випробувань при односторонньому нагріванні сталезалізобетонних плит без прикладення механічного навантаження згідно зі стандартним температурним режимом пожежі в умовах малогабаритної вогневої печі, були зафіксовані температурні значення в контрольних точках, необхідні для подальших розрахунків. Наступним етапом є визначення межі вогнестійкості

конструктивного елемента за критерієм несучої здатності шляхом розрахункового аналізу.

Запропонована методика дає змогу, на основі експериментальних результатів, отриманих за умов одностороннього теплового впливу згідно зі стандартною температурною кривою пожежі без навантаження, відповідно до вимог нормативних документів [24; 26], виконати розрахунок несучої здатності та визначити відповідну межу вогнестійкості залізобетонних плит (рис. 4.13).



Рисунок 4.13. Розрахункова схема моделі теплопередачі під час нагрівання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем

Загальна експериментально-розрахункова методика забезпечує можливість випробувань елементів сталезалізобетонних плит будівельних конструкцій на вогнестійкість згідно з температурним режимом, встановленим у [2], без прикладення механічного навантаження. Останнє враховується на подальшому етапі розрахункового аналізу. Вихідними даними для проведення таких розрахунків є результати експериментальних досліджень.

Методика призначена для визначення межі вогнестійкості плитних елементів сталезалізобетонних конструкцій за умови одностороннього теплового впливу. Мінімально необхідна кількість термодіаграм зображена на рис. 3.4. Доцільно

встановлювати по 4 термопари на кожній із поверхонь плити – по 2 навпроти западин та виступів профілю. Таке саме розміщення передбачають і на рівні арматури. Також рекомендується передбачити одну контрольну точку у центрі перерізу плити по її середній лінії – цього достатньо для оцінювання якості відтворення температурного поля. Загальна схема розміщення термопар і поділу перерізу на зони наведена на рис. 4.14. Конфігурація зони залежить від параметрів профілю (його кроку та глибини), а також від товщини сталезалізобетонної плити.

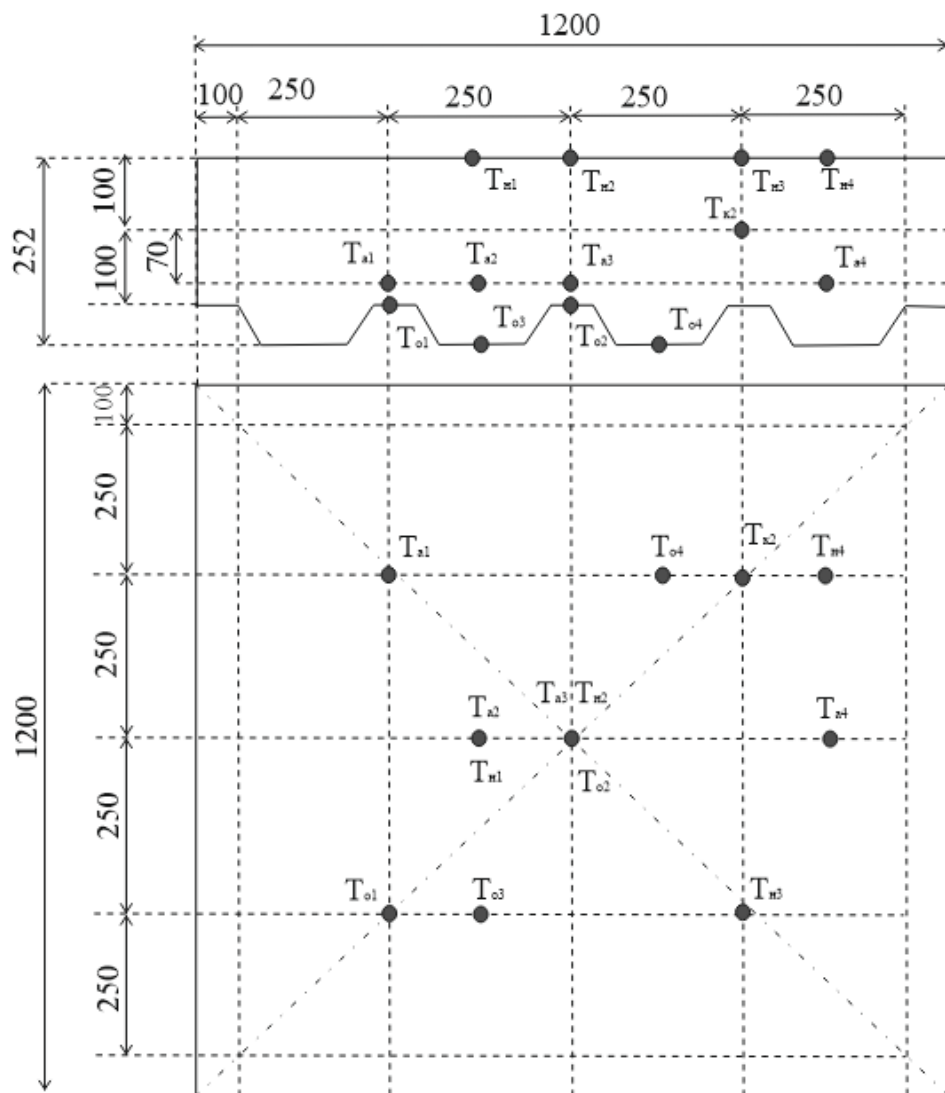


Рисунок 4.14. Схема розташування термопар і розбиття перерізу плити на зони: термопари $T_{o1} - T_{o4}$; на необігрівній поверхні – термістори $T_{n1} - T_{n4}$; на рівні арматури (0,03 м від поверхні) – термопари $T_{a1} - T_{a4}$; контрольна точка замірювання (на середній лінії перерізу плити) – термістор T_{k2} .

Методика дає змогу проаналізувати зміну механічних характеристик окремих шарів бетону та арматурної сталі залежно від температури нагрівання. Схема теплового впливу на плиту представлена на рис. 4.13. Урахування зниження міцності залізобетонного елемента є важливим етапом при визначенні параметрів напружено-деформованого стану перерізу плити з урахуванням шарнірного закріплення, геометричних характеристик, класу бетону та типу арматурної сталі. Розрахунок напружено-деформованого стану проводиться згідно з вимогами EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2. Для оцінювання температурного впливу на механічні характеристики використовується інтерполяція температур у вузлових точках перерізу на основі значень, отриманих у контрольних точках під час випробувань.

У більшості наукових досліджень, що стосуються теплотехнічного розрахунку залізобетонних плит за умов пожежного теплового навантаження, застосовується узагальнений інженерний підхід, який ґрунтується на таких положеннях [97–100]:

- для розрахунків використовується квазілінійне параболічне рівняння теплопровідності з граничними умовами третього роду, що враховують конвективний і променевий теплообмін із середовищем пожежі;
- температурний режим середовища задається стандартною температурною кривою пожежі [26];
- через значну різницю в теплопровідності між арматурною сталлю та бетоном теплообмін розраховується лише для бетонної частини конструкції;
- теплофізичні властивості бетону описуються функціями, залежними від температури, відповідно до [24];
- розв’язання рівняння теплопровідності виконується методом скінченних елементів з використанням програмного забезпечення «ANSYS Mechanical».

Рівняння теплопровідності має наступний вигляд [97-100]:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T) \quad (4.1),$$

де $\rho(T)$ – густина; $c_p(T)$ – питома теплоємність; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, залежний від температури T .

Для розв'язання рівняння теплопровідності використано граничні умови III роду [97]:

$$-\lambda(T) \frac{\partial \theta}{\partial r} = \alpha(T_P - T_W) \quad (4.2),$$

де T_P – температура пожежного середовища в пристінковому шарі; T_W – температура поверхні елемента; α – коефіцієнт теплообміну.

Коефіцієнт теплообміну враховує сукупний вплив конвекційного теплообміну та інфрачервоного (радіаційного) випромінювання. За спрощеною методикою його значення визначають за такою формулою:

$$\alpha = \alpha_P + \alpha_K \quad (4.3),$$

де α_P – коефіцієнт теплообміну випромінюванням.

Відповідно до рекомендацій [98, 99], конвективну та променисту складові теплообміну можна визначити за такими виразами:

$$\alpha_K = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) - \text{обігрівна поверхня};$$

$$\alpha = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) - \text{необігрівна (необігрівальна) поверхня};$$

$$\alpha_P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_W^4 - T_P^4}{T_W - T_P} \quad (4.4),$$

де $\varepsilon_c = 0.7$ – ступінь чорноти поверхні бетону [98, 99]; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – константа Стефана – Больцмана.

Температура пожежного середовища визначається за стандартною температурною кривою пожежі відповідно до формули (4.1).

Таблиця 4.1

Параметри граничних умов для залізобетонної плити

Параметр	Позн.	Од. вим.	Вел.	Покликання
Обігрівна сторона				
Конвективна складова коефіцієнта теплообміну	α_c	Вт/(м ² °C)	25	EN 1991-1-2 Eurocode 1
Ступінь чорноти	ε		0,7	EN 1992-1-2 Eurocode 4
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	α	Вт/(м ² °C)	9	EN 1991-1-2 Eurocode 1

Для теплотехнічних розрахунків сталезалізобетонної плити застосовано теплофізичні характеристики бетону відповідно до вимог другої частини стандарту Eurocode 2 [104]. У вказаному нормативному документі подано таблиці та графіки, які ілюструють зміну теплофізичних властивостей металу залежно від температури, а також визначено умови виконання розрахунків.

Параметри граничних умов для теплопереносу наведено в таблиці 4.1. Їх значення встановлено з урахуванням вимог та рекомендацій другої частини Eurocode 1 [105] та Eurocode 2 [104].

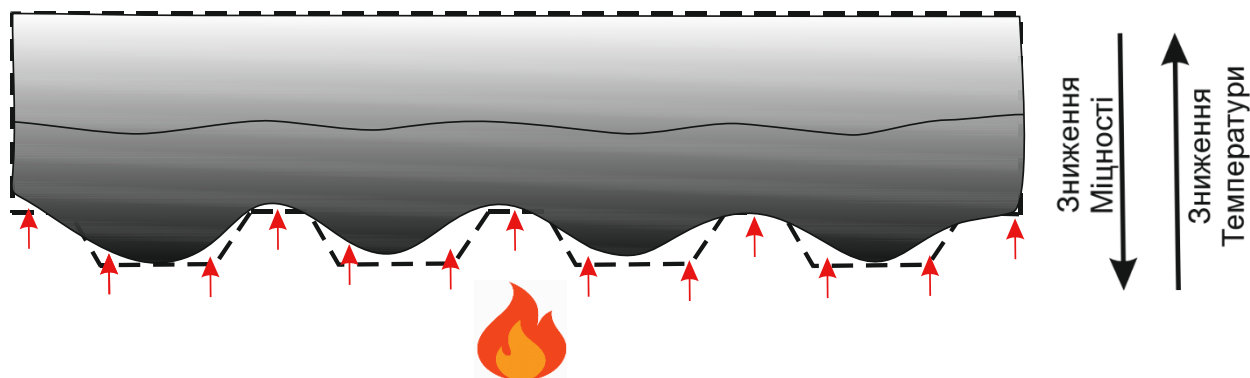


Рисунок 4.15. Зміна міцності в перерізі плити залежно від температури.

Аналіз даних рис. 4.15 та характеру навантаження конструкції свідчить, що сталезалізобетонна плита розглядається як окремий випадок нагрівання балки.

Основна відмінність полягає в тому, що у плиті ширина умовно вважається нескінченно великою, тому в розрахунках враховується лише односторонній тепловий вплив. Розрахунок міцності в умовах пожежі виконується аналогічно до балкових конструкцій, із врахуванням спрощення, пов'язаного з одностороннім нагрівом.

Також при оцінці вогнестійкості плит необхідно враховувати можливу втрату цілісності та теплоізоляційної здатності. Ці критерії враховуються як в експериментальних, так і в розрахункових дослідженнях. Враховуючи, що температура на необігріваній стороні плити не перевищила 140°C , втрата вогнестійкості відбувається виключно за критерієм несучої здатності [97–102].

Для визначення межі вогнестійкості залізобетонної плити, нагрітої у малогабаритній вогневій печі, необхідно враховувати: щохвилинні показники температури в контрольних точках (відповідно до рис. 4.3), клас бетону та арматурної сталі, тип заповнювача, діаметр, кількість та розташування арматурних стержнів (рис. 4.16). Додатково фіксуються геометричні параметри перерізу, товщина захисного шару бетону, довжина балки та величина розподіленого навантаження.

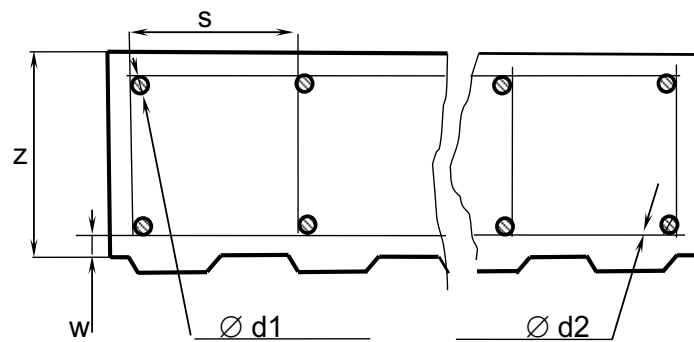


Рисунок 4.16. Схема розташування та діаметри арматури плити.

На рис. 4.17 подано приклад сторінки введення вихідних даних для розрахунку межі вогнестійкості, що містить параметри армування, геометрії та теплового

впливу. На рис. 4.18 показано сторінку з результатами розрахунку, яка містить оцінку несучої здатності за температурними умовами нагріву.

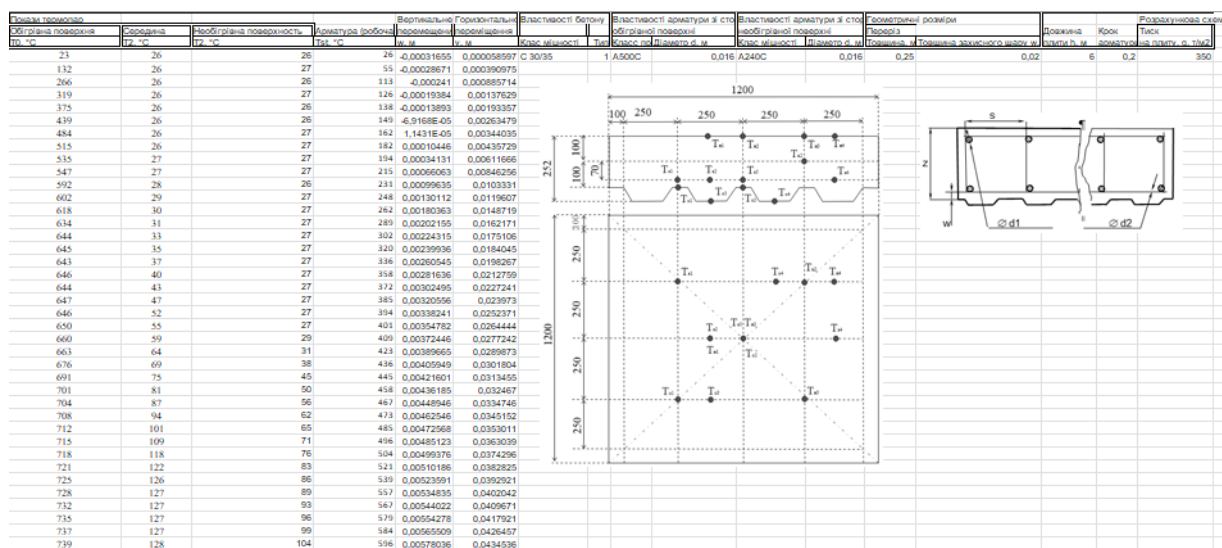


Рисунок 4.17. Сторінка введення початкових даних

Межа вогнестійкості плити

ФМВ = "Межа вогнестійкості не досягнута"

Ресурс несучої здатності плити

RSB = 52.05 %

Графік зниження несучої здатності плити

M, Нм

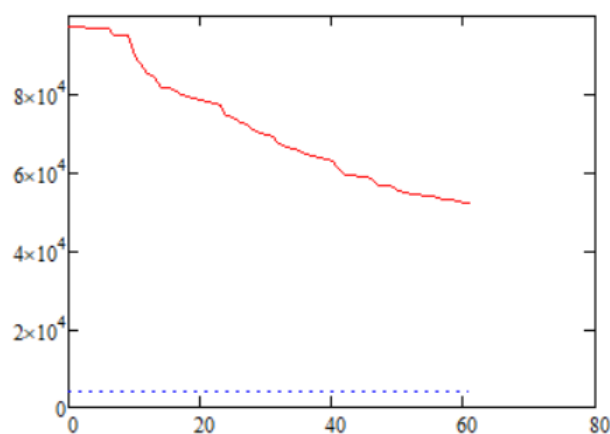


Рисунок 4.18. Сторінка виведення результатів

Згідно з рисунками 4.17 і 4.18, у процесі введення вихідних даних зниження міцності сталезалізобетонних плит відображається як у графічному, так і в

числовому форматі. При зміні параметрів початкових даних результати розрахунку автоматично оновлюються відповідно до нових умов.

4.4. Результати використання удосконаленого методу

Доцільно розглянути конкретний приклад аналізу залізобетонної плити. На рис. 4.6 наведено поперечний переріз балки та схему її армування, де вказані параметри робочої арматури відповідно до методичних рекомендацій, поданих у рис. 4.17. Це дозволяє наочно продемонструвати застосування методики для оцінювання вогнестійкості плити за критерієм несучої здатності.

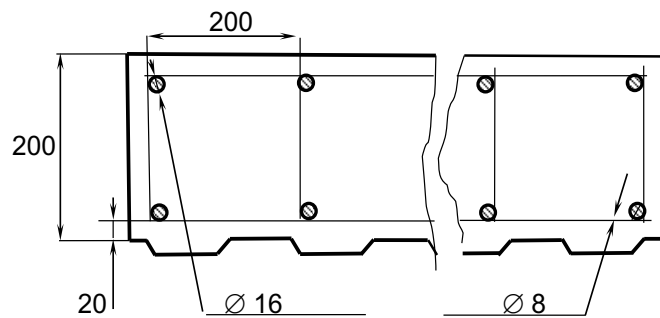


Рисунок 4.19. Параметри армування плити в перерізі.

Таблиця 4.2

Основні параметри залізобетонної плити

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
– довжина	b	6	м
– товщина захисного шару	w	0,03	
– товщина	z	0,22	
Тип бетону	Важкий	С 30/35 (В30)	
Густина бетону	ρ_B	2230	кг/м ³
Робоча арматура:		Клас А240С	м
– діаметр більший	d_1	0,016	
– діаметр менший	d_2	0,008	
– крок	s	0,2	

Після виконання інтерполяції було отримано температурний розподіл по перерізу плити, який представлено на рис. 4.20. Ці дані є основою для подальшого розрахунку напружено-деформованого стану конструкції з урахуванням температурного впливу та зміни фізико-механічних властивостей матеріалів.

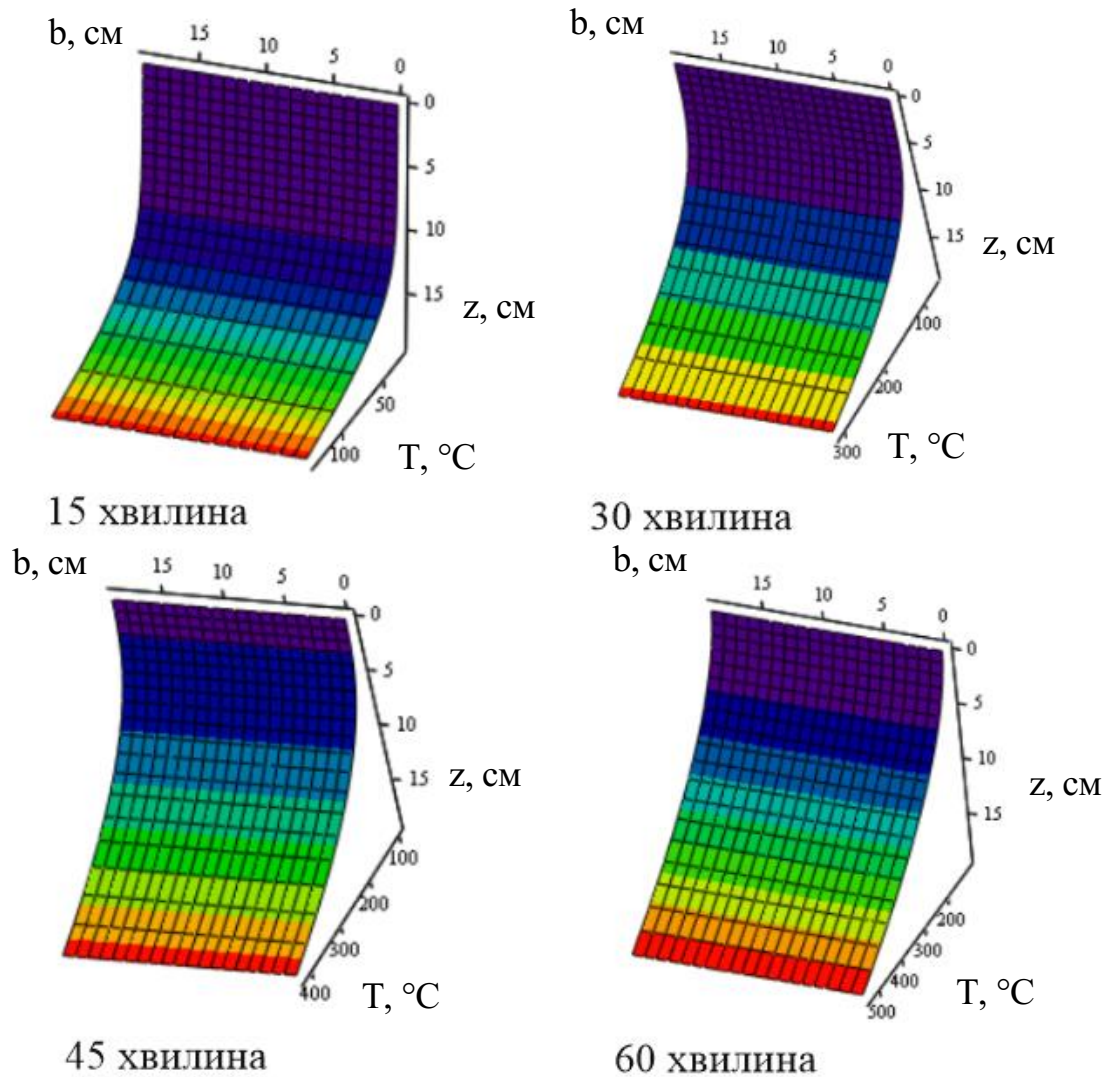


Рисунок 4.20. Результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу.

У результаті проведеного розрахунку встановлено, що межа вогнестійкості не досягається протягом перших 60 хвилин впливу високої температури. При цьому залишковий ресурс несучої здатності конструкції становить 3 % від початкового.

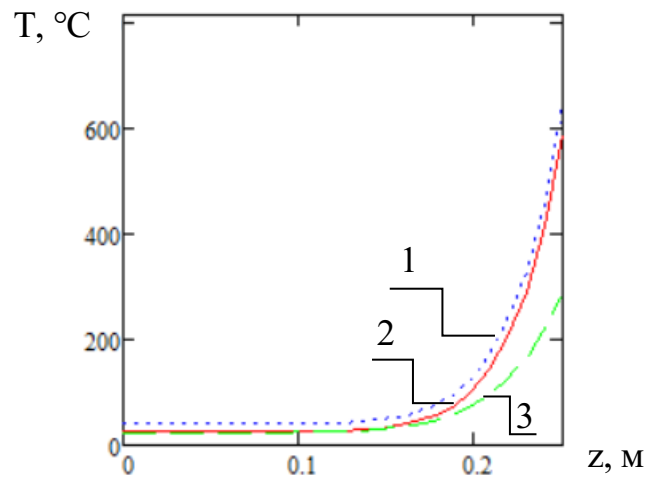


Рисунок 4.21. Узагальнені результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу

На рис. 4.22 наведено графік зміни несучої спроможності плити, побудований на основі отриманих даних для заданих характеристик.

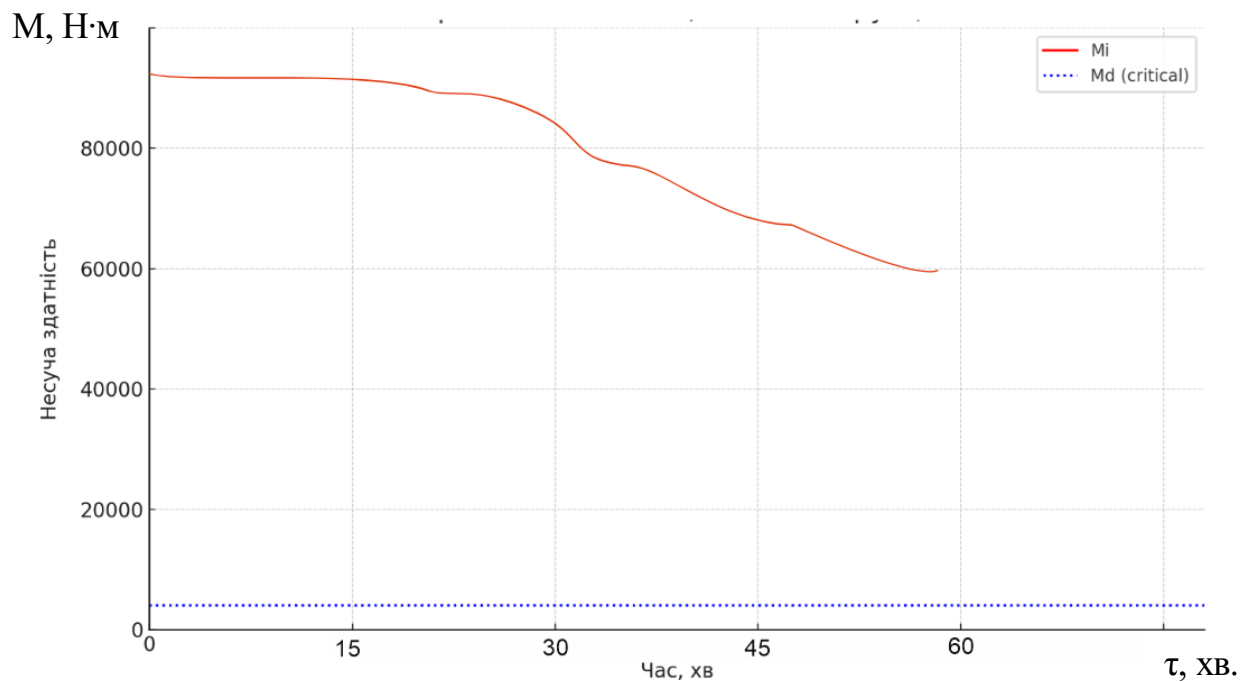


Рисунок 4.22. Графік зниження несучої здатності плити за умов дії розподіленого навантаження $3,5 \text{ т/м}^2$, побудований на основі експериментально визначених температур у контрольних точках конструктивного елемента.

На рис. 4.22 подано результати, отримані на основі температур прогрівання шарів плити, що відповідає характеристикам досліджуваного зразка під час експерименту. Також були враховані додаткові параметри – довжина плити та розподілене навантаження, передбачене проектом під час експлуатації конструкції в будівлі. Зміна цих параметрів дозволяє визначати межу вогнестійкості для плит з іншими габаритами та навантаженням.

Оскільки межу вогнестійкості не досягнуто, здійснено інтерполяцію температур прогрівання в ключових точках перерізу до моменту втрати несучої здатності. На рис. 4.23 подано результати інтерполяції зниження несучої здатності сталезалізобетонної плити під дією розподіленого навантаження $3,5 \text{ т/м}^2$ до досягнення граничного стану.

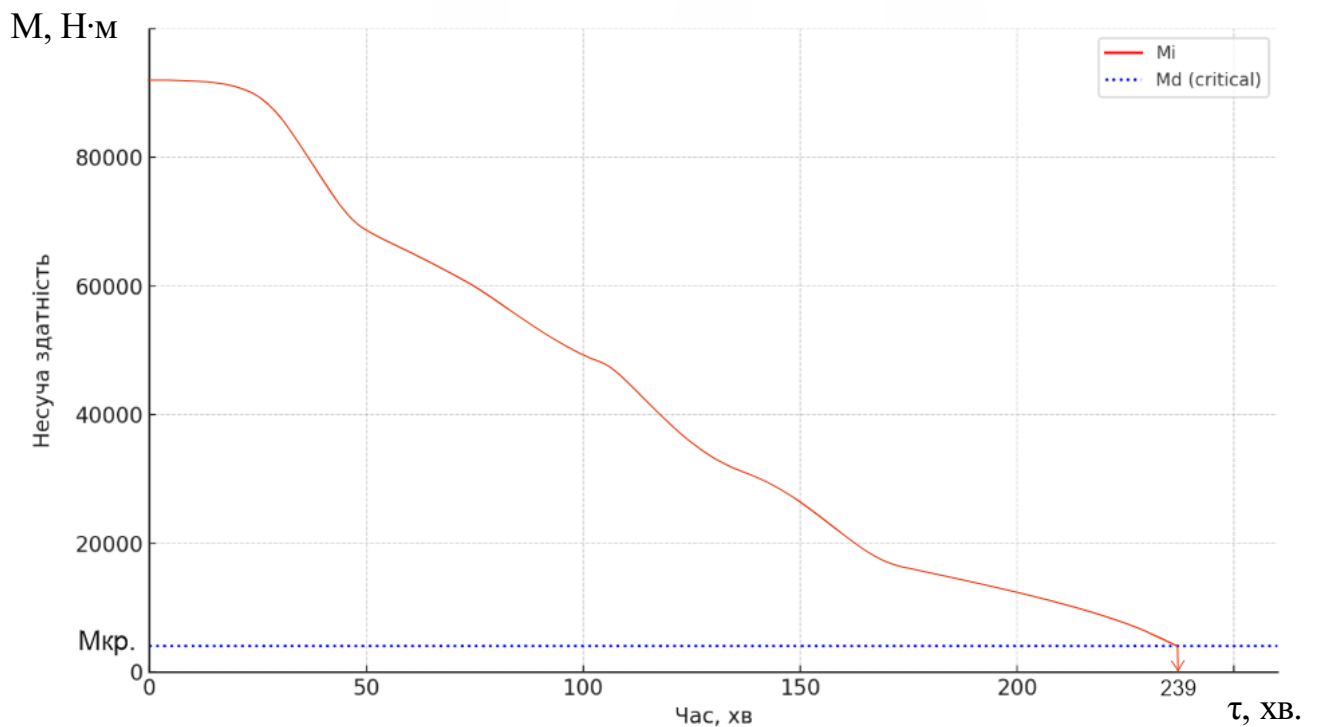


Рисунок 4.23. Результати інтерполяції зниження несучої спроможності плити до моменту настання граничного стану втрати несучої здатності

Відповідно до отриманих результатів (рис. 4.23), граничний стан втрати несучої здатності для плити з заданими характеристиками настає на 239-й хвилині.

4.5. Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості плити

Порівняно результати, отримані за запропонованою методикою, з експериментальними даними, наведеними в науковій літературі. Визначено відхилення між результатами розрахунків за методикою та результатами випробувань на вогнестійкість аналогічних конструкцій у вогневих печах.

Додатково проведено розрахунок межі вогнестійкості плити аналогічного перерізу довжиною 6 м за умов дії розподіленого навантаження 350 т/м^2 . Для врахування тривалішого теплового впливу виконано інтерполяцію температур та розрахунок згідно з описаною методикою. Результати розрахунку наведено на рис. 4.23.

З рисунка 4.23 видно, що граничний стан втрати несучої здатності плити заданої товщини та параметрів армування, довжиною 6 м, настає на 239-й хвилині. Адекватність розрахункового методу підтверджено шляхом порівняння з експериментальними даними, описаними в наукових джерелах. Оцінено можливу величину похибки.

Аналізовано залізобетонну плиту розміром $220 \times 3200 \times 6000 \text{ мм}$ з важкого бетону на гранітному заповнювачі. Як робочу арматуру застосовано А500С, а як поперечну – А240С (рис. 4.24). Геометричні параметри конструкції взято згідно з [41].

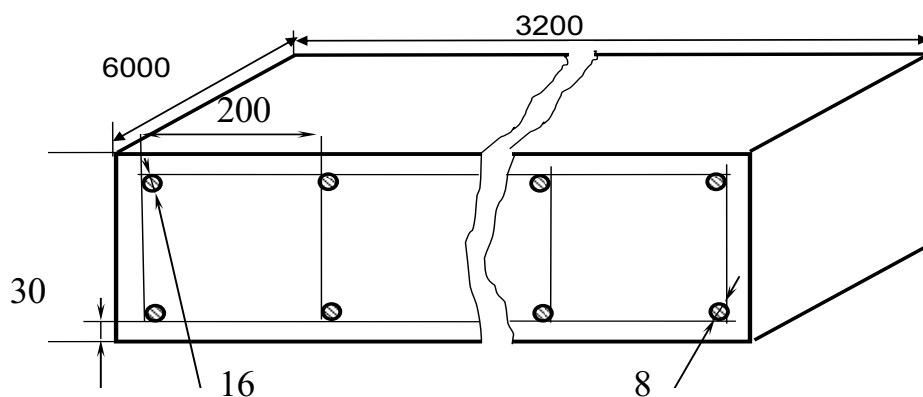


Рисунок 4.24. Розрахункова схема залізобетонної плити, що була використана під час оцінювання вогнестійкості за допомогою вогневої печі

Опис згідно з поданими даними сформульовано коректно. Він логічно пов'язує джерело [41] із виконаним розрахунком і підготовкою порівняльного аналізу. Таблиця 4.3 є завершальним елементом цього аналізу, що демонструє валідацію розробленого алгоритму.

Таблиця 4.3

Дані аналізу адекватності результатів розрахунку за розробленим методом

Захисний шар бетону, мм	Характеристики бетону		Характеристики арматури		Розподілене навантаження, т/м^2	Відхилення температури середини плити, %	Межа вогнестійкості, Отримана експериментально, хв.	Розрахункова межа вогнестійкості, хв.	Відносне відхилення, %
	Тип	Клас міцності	Клас міцності	Діаметр, мм					
30	0	C30/35	A5400	16	350	8	не менше 180 хвилин	239	24

Дані, отримані в результаті експериментальної роботи, та результати, здобуті за експериментально-розрахунковим методом, демонструють узгодженість, незважаючи на те, що під час експерименту граничний стан несучої здатності досягнутий не був. Проте обидва підходи підтвердили, що межа вогнестійкості плит становить не менше ніж 180 хвилин, що дозволяє вважати розрахункові результати достовірними та підтвердженими експериментально.

4.6. Висновки до розділу 4

1. У даному розділі здійснено удосконалення методики оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит за рахунок визначення температурних полів на основі точкових замірів температури під час експерименту, що дало змогу

оцінити межу вогнестійкості конструкції з урахуванням нерівномірного прогрівання та особливостей гофрованого профілю без необхідності проведення повномасштабних випробувань, а лише з використанням малогабаритної вогневої печі. Температурний режим у камері вогневої печі під час експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання відповідав стандартній температурній кривій пожежі, що підтверджує коректність заданих граничних умов.

2. Розподіл температур по поверхні гофрованого сталевго профілю був відносно рівномірним, із максимальним відхиленням у межах 5–7 %, незалежно від орієнтації плити (горизонтальної чи вертикальної). Це дозволяє вважати орієнтацію зразка несуттєвим чинником для дослідження теплового впливу у малогабаритній вогневій печі.

3. Обґрунтовано підхід до побудови температурного поля в перерізі сталезалізобетонної плити під час дії нагрівання шляхом інтерполяції даних з обмеженої кількості термопар, що дало змогу зменшити потребу у вимірювальному обладнанні на 30 % без втрати точності, а також враховує вплив форми профілю та особливостей армування.

4. За результатами чисельного аналізу визначено, що граничний стан втрати несучої здатності плити без прикладеного навантаження настає на 239-й хвилині стандартного пожежного впливу. Температура на необігріваній стороні зразка не перевищила 140 °C, що свідчить про збереження теплоізоляційної здатності та цілісності конструкції протягом усього періоду моделювання. Межа вогнестійкості визначається за критерієм несучої здатності.

5. Результати, отримані шляхом розрахунку за запропонованою методикою, продемонстрували високу збіжність з даними експериментальних випробувань з наукових джерел, що дозволяє рекомендувати дану методику для оцінки вогнестійкості плит різних типів та реальних розмірів.

РОЗДІЛ 5.

АЛГОРИТМ ЗАСТОСУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ

5.1. Загальна схема удосконалень експериментально-розрахункової методики оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем

На основі матеріалів розділів 1–4, у яких було проаналізовано існуючі типи вогневих установок, поширені методики та засоби проведення вогневих випробувань, їхню актуальність, а також розглянуто особливості комп'ютерного моделювання, етапи побудови обчислювальної моделі камери вогневої установки, проведення експериментальних досліджень з нагрівання будівельних конструкцій та розрахункову частину методики оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, сформовано загальний алгоритм оцінювання межі вогнестійкості. Цей алгоритм реалізовано в удосконаленій експериментально-розрахунковій методиці та подано у вигляді схеми на рис. 5.1.

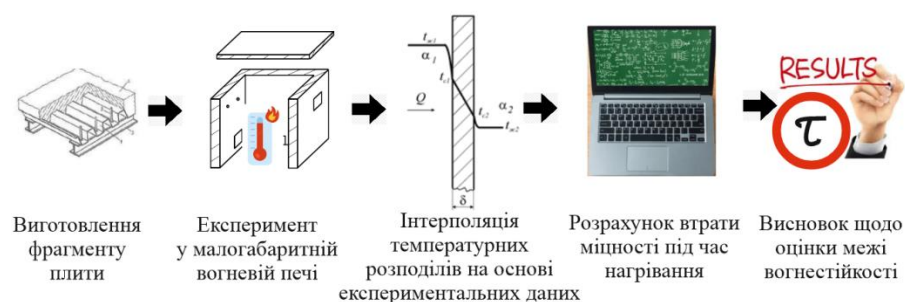


Рисунок 5.1. Загальна схема алгоритму оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем на основі удосконаленого експериментально-розрахункового методу.

Згідно із схемою на рис. 5.1. для оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем за допомогою удосконаленого

експериментально-розрахункового методу алгоритм передбачає наступні основні елементи:

1. Виготовлення сталезалізобетонного елементу плити з гофрованим профілем відповідно до розмірів малогабаритної вогневої установки.

2. Підготовка фрагменту до випробувань: розміщення датчиків контролю температури у камері вогневої установки та у досліджуваному фрагменті, встановлення зразка у випробувальну піч, герметизація камери.

3. Проведення експериментального дослідження з нагрівання досліджуваного фрагмента у камері малогабаритної вогневої установки за обраним температурним режимом пожежі.

4. Опрацювання даних експериментальних досліджень. Перевірка адекватності результатів. Систематизація отриманих даних. Створення файлів відповідного формату для проведення розрахункової частини методу.

5. Проведення розрахунку з інтерполяції температурних розподілів за точковими замірами отриманими під час експериментів. Перевірка адекватності розрахунків.

6. Проведення розрахунку з оцінювання межі вогнестійкості розрахунковим шляхом та аналіз отриманих результатів. Перевірка адекватності розрахунків.

Вище коротко описано загальний алгоритм оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, що дає змогу перейти до детального опису удосконаленої експериментально-розрахункової методики.

5.2. Особливості елементів експериментального обладнання

Для реалізації експериментальної частини з нагрівання фрагмента сталезалізобетонної плити необхідно використовувати вогневу установку, яка відповідає таким основним вимогам:

1. Рівномірність прогрівання камери вогневої печі та, відповідно, нагрівання обігрівної поверхні досліджуваного зразка. Для цього доцільно застосовувати установку з мінімально допустимими розмірами камери, яка

забезпечує достатню відстань між полум'ям і зразком, а також має висоту, необхідну для утворення об'єму, в якому можлива ефективна циркуляція продуктів горіння. Це дозволяє забезпечити температурний режим, наближений до стандартної температурної кривої пожежі у камері установки.

2. Розміщення пальників. Пальники слід розташовувати з урахуванням вимог рівномірного розподілу тепла. При цьому необхідно забезпечити мінімальну відстань від факела полум'я до конструктивних елементів установки для уникнення локального перегріву стінок. Рекомендовано дотримуватися вимог стандартів щодо розміщення пальників у межах допустимих відстаней від поверхонь камери.

3. Відвід продуктів згоряння. Отвір для виведення продуктів горіння доцільно розташовувати в нижній частині задньої стінки камери вогневої печі з можливістю регулювання його розміру. Це забезпечує стабільну роботу установки та контрольований тепловий режим у процесі випробування.

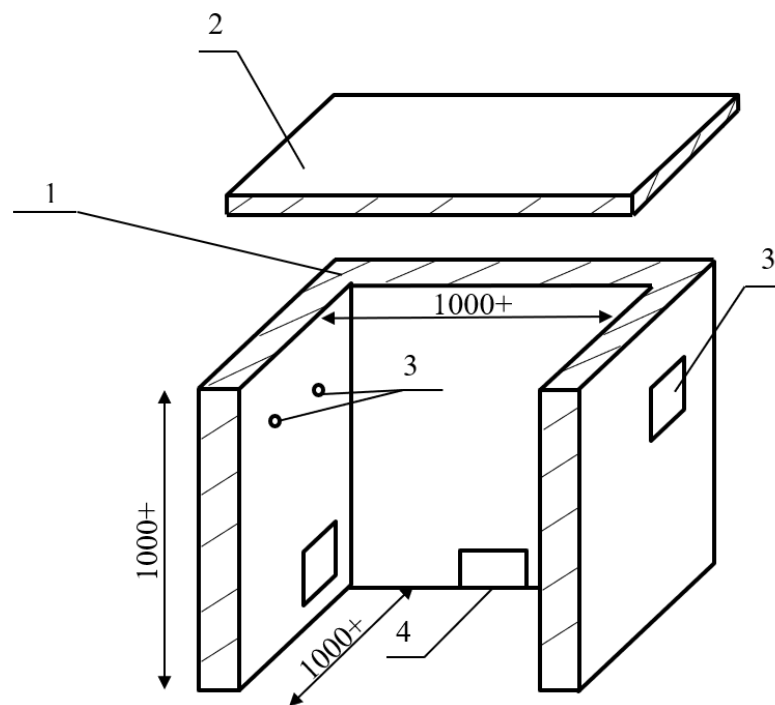


Рисунок 5.2. Доцільні мінімально можливі геометричні параметри малогабаритної вогневої установки для проведення експериментальної частини методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем: 1 – огороження печі з вогнетривких матеріалів; 2 – з'ємна панель; 3 – місця встановлення засобів вимірювальної техніки.

Як приклад, на рис. 5.2 зображено рекомендовані мінімально допустимі геометричні параметри малогабаритної вогневої установки, яка може бути використана для дослідження теплового впливу пожежі на сталезалізобетонні плити відповідно до результатів розрахунків.

У розділі 3 було застосовано універсальну малогабаритну установку. На рис. 5.2. продемонстровано концептуальні рішення установки для проведення експериментальної частини оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем. Під час проведення експериментів, доцільно дотримуватись наступного алгоритму дій:

1. Камеру вогневої установки доцільно виконувати у п-подібній формі, що забезпечує можливість випробування основних типів залізобетонних елементів конструкцій, таких як стіни, плити, балки та колони. Завдяки двом знімним панелям і чотирьом отворам для пальників із можливістю регулювання їхнього розташування, можна забезпечити рівномірний розподіл теплового потоку відповідно до типу елемента, що досліджується.

2. Знімні панелі слід виготовляти на основі металевого каркасу, заповненого мінеральною ватою, стійкою до температур до 1000 °С, та облицьованого листом із нержавіючої сталі.

3. Мінімальна висота розташування отвору для виведення продуктів згоряння, згідно з розрахунками, має становити 0,8 м. Цей отвір доцільно розміщувати у нижній частині задньої стінки камери по її центру.

4. Для формування необхідного температурного режиму в камері рекомендується використовувати газ як паливо. Це екологічно безпечніший варіант, що містить приблизно вдвічі менше шкідливих речовин, зокрема CO₂. Газ доцільно подавати за допомогою двох балонів, оснащених редукторами, які слід розміщувати на безпечній відстані від камери.

5. У якості пальників використовуються газоповітряні пристрої довжиною до 715 мм і діаметром сопла до 76 мм. Кількість – 2 одиниці.

6. Для фіксації температури у досліджуваному зразку та в камері необхідно встановити термопари з діапазоном від 0 °С до 1 300 °С, а також

термістори, здатні вимірювати температуру в межах від 30 °С до 300 °С. Кількість і розташування датчиків залежать від типу конструктивного елемента. Рекомендовані місця їх встановлення наведено для несучих сталезалізобетонних плит.

7. Зчитування цифрових показників температури доцільно здійснювати за допомогою технічного засобу вимірювання, що має чутливість 0,25 °С, враховує температуру холодних спаїв, автоматично вносить поправки в показники та здатний у реальному часі передавати дані на комп'ютерне обладнання (наприклад, ноутбук).

5.3. Умови виготовлення та підготовки фрагментів сталезалізобетонних конструкцій

Для проведення експериментальних досліджень необхідно виготовити щонайменше три зразки фрагментів сталезалізобетонних плит з метою перевірки відтворюваності отриманих температурних показників.

Виготовлення зразків доцільно здійснювати із застосуванням стандартної розбірної опалубки. Після заливання бетонної суміші елемент повинен витримуватись в опалубці протягом 7 діб. Після розпалублення зразок необхідно зберігати у приміщенні із стабільними умовами температури й вологості протягом 28 діб до початку випробувань.

Дозування компонентів бетонної суміші рекомендовано здійснювати за допомогою вагових дозаторів, що забезпечують точність вимірювання маси інгредієнтів та дозволяють отримати якісну й однорідну суміш. Змішування слід виконувати в бетономішалці, а ущільнення суміші проводити із застосуванням глибинних вібраторів.

Для підвищення міцності сталезалізобетонного фрагмента необхідно передбачити арматуру – основну та допоміжну. Основна арматура розміщується у вертикальному або горизонтальному напрямках відповідно до функціонального призначення елемента. Допоміжна арматура використовується для зміцнення

ділянок із підвищеним рівнем напружень, зокрема в місцях зміни товщини елемента, що запобігає утворенню тріщин і зниженню міцності під час дії високих температур. Проектування арматури повинно базуватися на інженерних розрахунках та відповідати вимогам чинних нормативних документів.

Вологість виготовлених зразків повинна відповідати умовам навколишнього середовища. Допускається природне або штучне висушування при температурі не вище $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ за умови підтримання відносної вологості повітря в межах 45–75 %.

Згідно з вимогами [26], на обігрівальній стороні досліджуваного зразка повинна бути встановлена щонайменше одна термopара на кожен квадратний метр, але не менше п'яти датчиків.

На основі проведеного експерименту, що описаний у розділі 3, та для забезпечення достатнього обсягу вхідних даних для розрахунків, на рис. 5.3 представлено приклад схеми розміщення температурних датчиків у досліджуваному фрагменті.

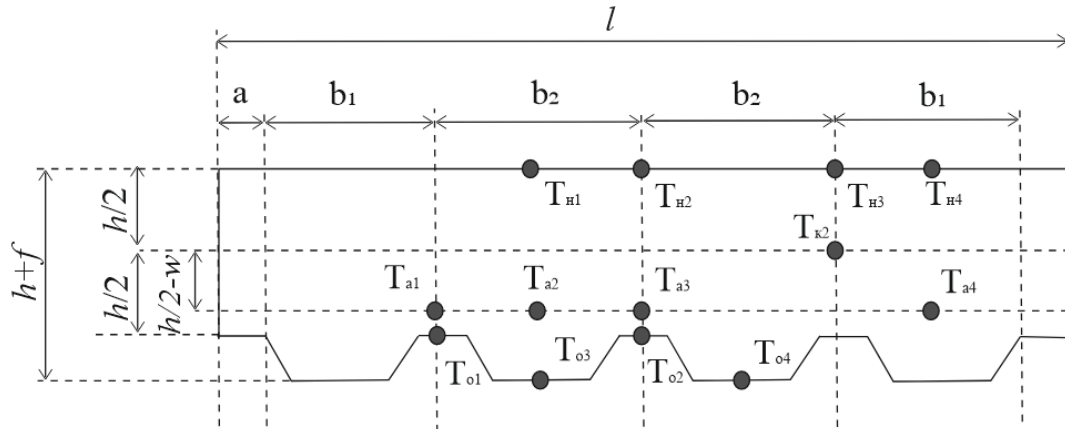


Рисунок 5.3. Приклад схеми розташування датчиків контролю температури у досліджуваному фрагменті: a, b, l, h, f, w – геометричні параметри зразка; $T_{o1} - T_{o4}$ – термopари на необігрівній поверхні; $T_{н1} - T_{н4}$ – термopари на рівні арматури; $T_{a1} - T_{a4}$ – термістори або термopари контрольна точка замірювання (на середній лінії перерізу плити); $T_{к2}$ – термістори або термopари у контрольній точці.

Розташування датчиків контролю температури у зразку для випробувань повинно відповідати основним вимогам для ефективного та точного вимірювання температури. Рекомендовано враховувати наступні принципи:

1. Для отримання повної інформації про температурний режим усередині плити датчики доцільно розташовувати на різних глибинах, тобто на рівні арматури, ближче до поверхні та в середині перерізу плити.
2. Датчики повинні бути розташовані рівномірно по всій площі плити для забезпечення коректного вимірювання температури.
3. Розташування датчиків повинно бути таким, щоб мінімізувати вплив на міцність та структурну цілісність плити.
4. Якість метрологічної техніки має відповідати вимогам до точності експериментальних випробувань.

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

5.4. Алгоритм проведення експерименту з нагрівання фрагменту сталезалізобетонної плити

До початку проведення експерименту необхідно зафіксувати дату його виконання, температуру та вологість повітря в приміщенні, а також здійснити вимірювання габаритних розмірів дослідного зразка та його товщини.

Для проведення експериментального дослідження з нагрівання сталезалізобетонної плити у малогабаритній вогневій установці, призначеній для вивчення теплового впливу пожежі на будівельні конструкції, необхідно виконати наступні дії:

1. У першу чергу, встановити дослідний фрагмент у п-подібне огороження печі. Фрагмент сталезалізобетонної плити розміщують у верхній або передній частині установки, іншу відкриту частину камери закрити знімною панеллю.

2. Необхідно встановити ущільнювальні елементи між стінками камери вогневої установки, фрагментом та знімною панеллю.

3. Для створення необхідного температурного режиму застосовуються два пальники, які розміщують в залежності від розміщення досліджуваного фрагменту: у верхній та нижній частинах протилежної стінки установки при вертикальному розміщенні або внизу камери печі – при горизонтальному. Пальники мають бути розташовані так, щоб факели полум'я не перетиналися між собою та знаходилися на відстані 80 см від дослідного зразка. Отвори для пальників, які не використовуються під час випробування, необхідно щільно заповнити мінеральною ватою або іншим ущільнювачем для запобігання витоку пічних газів.

4. Температурні датчики встановлюють у заздалегідь підготовлені отвори відповідно до конфігурації дослідного зразка. У третьому розділі подано приклад конструкції камери установки та схему розміщення температурних датчиків. У разі зміни геометрії установки слід виконати додаткове комп'ютерне моделювання для уточнення розміщення датчиків. Відповідні рекомендації та приклади наведені у третьому розділі.

5. Запалити пальники, встановлені у відповідні отвори, та подати газ із балонів, створюючи необхідний температурний режим усередині камери установки. У нижній частині камери передбачено отвір для відведення продуктів горіння. Контроль температури дослідного зразка здійснюється за допомогою спеціалізованих вимірювальних пристроїв, а обробка отриманих даних виконується згідно з вимогами чинних стандартів. Це дозволяє отримати експериментальні дані, які надалі використовуються у розрахунковій частині методики для визначення фактичної межі вогнестійкості.

Загалом дотримання описаного алгоритму забезпечує можливість проведення достовірного експериментального дослідження теплового впливу пожежі на несучу сталезалізобетонну плиту, що дозволяє отримати достовірні дані для подальшої оцінки межі її вогнестійкості розрахунковим шляхом.

5.5. Вимоги до отриманих результатів

Під час проведення експериментального дослідження з нагрівання фрагмента сталезалізобетонної плити температура в камері печі має відповідати нормам, встановленим відповідними стандартами [26]. Наприклад, як описано у третьому розділі, стаціонарний температурний режим було досягнуто на 28-й хвилині експерименту при температурі 980 °С шляхом регулювання потужності нагрівальних елементів печі. Загальна тривалість нагріву зразка становила 60 хв. Проте тривалість експерименту визначається залежно від типу досліджуваної конструкції та її очікуваної межі вогнестійкості. Якщо, наприклад, розглядається конструкція з межею вогнестійкості 180 хв, необхідно фіксувати температурні значення щохвилини протягом усього періоду випробування.

Після завершення експериментального нагріву з метою виконання розрахункового аналізу межі вогнестійкості потрібно отримати та зафіксувати такі дані:

1. Провести візуальний огляд для визначення наявності або відсутності втрати цілісності, теплоізоляційної та несучої здатності дослідного зразка.
2. Зібрати дані про зміну температури в різних точках фрагмента сталезалізобетонної плити упродовж часу випробування. Дані доцільно подавати у вигляді графіка: по осі абсцис – час, по осі ординат – температура.
3. Забезпечити рівномірність прогрівання конструкції по всіх площинах, де встановлені термопари. Приклад розміщення температурних датчиків для експериментального дослідження нагріву сталезалізобетонної плити подано на рис. 5.3.
4. Температура на необігрівній стороні дослідного зразка не повинна перевищувати 140 °С.
5. Зазначити клас бетону та тип арматурної сталі з боку нагрівання та з протилежного боку, а також діаметр та крок арматури.
6. Виміряти геометричні параметри: довжину, товщину елемента та товщину захисного шару бетону.

7. Визначити проєктне навантаження, яке передбачено для досліджуваної конструкції.

Усі вищезазначені експериментальні дані будуть використані як основа для подальших інженерних розрахунків, спрямованих на визначення межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит.

5.6. Інтерполяція температурних розподілень всередині фрагменту сталезалізобетонної плити

Методика застосовується для оцінювання межі вогнестійкості елементів будівельних конструкцій, зокрема тих, які піддаються впливу теплового потоку за умов одностороннього нагрівання.

На основі результатів проведеного експериментального дослідження необхідно ввести основні вихідні дані, що детально наведені в розділі 4, до таблиці Excel. Надалі ці дані слід імпортувати до програмного середовища Mathcad для виконання відповідних інженерних розрахунків (рис. 5.4–5.5).

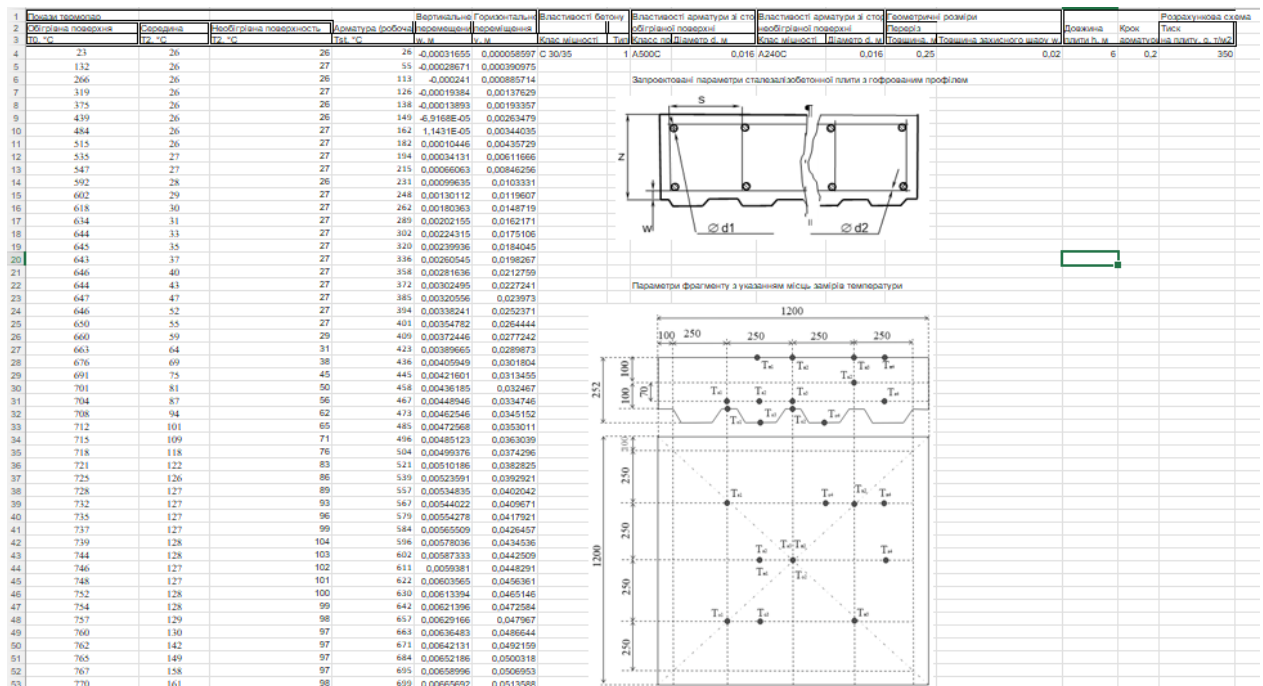


Рисунок 5.4. Сторінка введення початкових даних в Excel для оцінювання межі вогнестійкості

```

r :=
    slabl.xls

T0 := Ish<0>  T1 := Ish<1>  T2 := Ish<2>  Ts := Ish<3>
wy := Ish<4>  wx := Ish<5>

klassbet := Ish<0,6>  type := Ish<0,7>
klassarm1 := Ish<0,8>  klassarm2 := Ish<0,10>  d1 := Ish<0,9>  d2 := Ish<0,11>
z := Ish<0,12>  w := Ish<0,13>  h := Ish<0,14>  s := Ish<0,15>
Qn := Ish<0,16>

fb := 8·106 if klassbet = "C 8/10" ∨ klassbet = "LC 8/9"
      12·106 if klassbet = "C 12/15" ∨ klassbet = "LC 12/13"
      16·106 if klassbet = "C 16/20" ∨ klassbet = "LC 16/18"
      20·106 if klassbet = "C 20/25" ∨ klassbet = "LC 20/22"
      25·106 if klassbet = "C 25/30" ∨ klassbet = "LC 25/28"
      22·106 if klassbet = "C 30/35" ∨ klassbet = "LC 30/33"
      32·106 if klassbet = "C 32/40"

fbt := 0.75·106 if klassbet = "C 8/10" ∨ klassbet = "LC 8/9"
        0.92·106 if klassbet = "C 12/15" ∨ klassbet = "LC 12/13"
        1.1·106 if klassbet = "C 16/20" ∨ klassbet = "LC 16/18"
        1.35·106 if klassbet = "C 20/25" ∨ klassbet = "LC 20/22"
        1.55·106 if klassbet = "C 25/30" ∨ klassbet = "LC 25/28"
        1.75·106 if klassbet = "C 30/35" ∨ klassbet = "LC 30/33"
        1.85·106 if klassbet = "C 32/40"

fs1 := 240·106 if klassarm1 = "A240C"
        400·106 if klassarm1 = "A400C"
        500·106 if klassarm1 = "A500C"
        600·106 if klassarm1 = "A600C"
        800·106 if klassarm1 = "A800CK"
        1000·106 if klassarm1 = "A1000"
        400·106 otherwise

```

Рисунок 5.5. Лістинг першої сторінки Mathcad для оцінювання межі вогнестійкості

У процесі розрахунку формується візуалізація результатів інтерполяції температурних даних (рис. 5.6.), що ґрунтується на інформації, введений на сторінці з початковими даними (рис. 5.4). У разі зміни вхідних параметрів, інтерпольовані значення температур автоматично коригуються відповідно до оновлених даних.

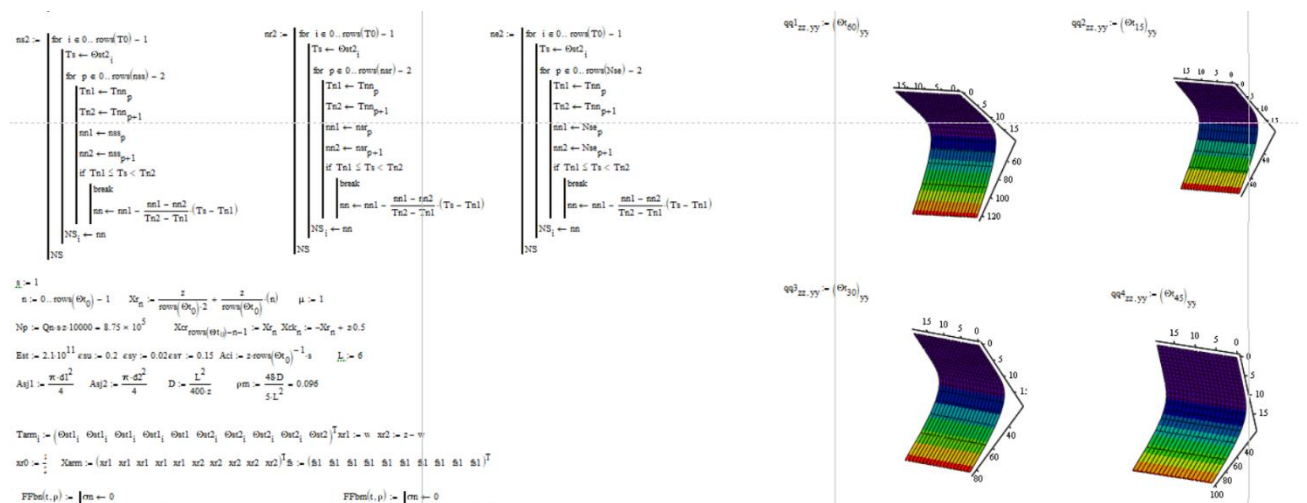


Рисунок 5.6. Приклад результату виконаної інтерполяції за значеннями термопар визначених місць перерізу плити

Для здійснення інтерполяції температур згідно з рекомендаціями [42] були взяті результати розрахунку теплової задачі для несучих будівельних конструкцій.

5.7. Алгоритм розрахунку міцності плити на основі даних інтерполяції

Для розв'язання задачі на міцність застосовується зонний метод, який полягає в поділі поперечного перерізу плити на дві області: область, що зберігає несучу здатність завдяки залишковій міцності ненагрітого бетону, та область, яка втратила несучу здатність внаслідок дії високих температур. Послідовність дій включає наступні етапи:

1. Вихідні характеристики залізобетону визначаються згідно з рекомендаціями [25], залежно від температурного впливу.
2. Половину товщини перерізу необхідно розбити на n паралельних зон однакової товщини, де $n \geq 3$.
3. Для кожної із зон визначається середнє значення температури.
4. Відповідно до графічної залежності зниження міцності бетону від температури для кожної зони встановлюється коефіцієнт зниження опору на стиск $k_c(\theta_i)$.
5. Розраховується коефіцієнт $(1 - 0,2/n)$, що враховується під час розрахунку температурного розподілу згідно з формулою (4.12), а також визначається середній коефіцієнт зниження опору на стиск у перерізі.
6. Обчислюється ширина ушкодженої зони в перерізі для плит, що працюють на стиск, згідно з формулою (4.13).

На основі розрахованих значень максимальних моментів будується графік зниження несучої здатності сталезалізобетонної плити за заданих характеристик. Приклад такого графіка наведено на рис. 5.7.

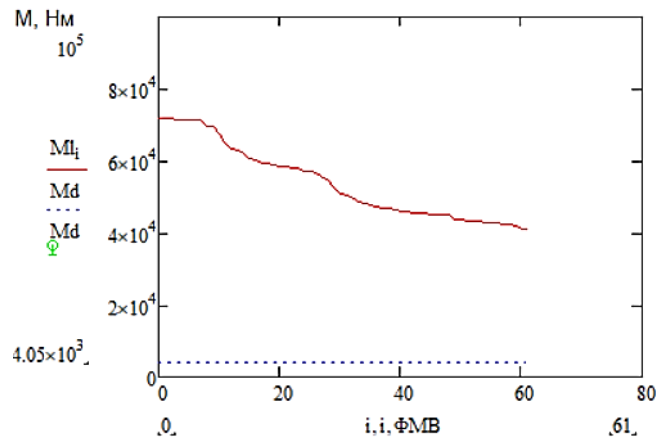


Рисунок 5.7. Графік зниження несучої здатності плити з розподіленим навантаженням 600 т·м.

На рис. 5.7 наведено результати розрахунку. Вихідні дані плити відповідали характеристикам досліджуваного зразка та температурному розподілу по її шарах, зафіксованому під час експериментального нагрівання. У результаті проведеного аналізу встановлено, що межа вогнестійкості сталезалізобетонної плити довжиною 6 м при дії розподіленого навантаження 300 т·м упродовж 60 хвилин не настає. Залишковий ресурс несучої здатності конструкції за таких умов становить 53 %.

5.8. Валідація результатів отриманих за удосконаленням експериментально-розрахунковим методом

Перевіряння адекватності або як її визначають у сучасних нормативних документах «валідація» [26] проведених експериментів необхідна для визначення, на скільки експерименти здатні до відтворення результатів, тобто переконатися в достовірності та точності отриманих даних, та чи відповідають випробування встановленим вимогам стандартів. Це важливо для забезпечення надійності і якості матеріалів, які були піддані вогневим випробуванням. Некоректне перевіряння може призвести до недостовірних висновків.

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

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

Відповідно до робіт [23, 29] доцільно перевірити адекватність виконаних експериментів. Для цього необхідно розрахувати відносні, абсолютну похибки експериментальних даних та для послідовного порівняння дисперсій показів температур кожного датчику контролю температур, які розташовані у досліджуваному фрагменті, з дисперсією відтворюваності експериментальних досліджень.

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

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

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

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

У третьому розділі наведено приклад подібної перевірки, де відповідно до отриманих даних виконаного експериментального дослідження розраховано відносну і абсолютну похибки та відповідно (F-критерій Фішера).

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

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

Метод апроксимації температурних розподілів на основі точкових замірів температури, отриманих під час нагрівання сталезалізобетонної плити за стандартним температурним режимом пожежі, описано у четвертому розділі дисертаційного дослідження.

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

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

5.9. Детальна схема проведення оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит за удосконаленим експериментально-розрахунковим методом

З метою більш чіткого розуміння створеної розрахунково-експериментальної методики оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем з використанням малогабаритних вогневих печей для вирішення теплотехнічної задачі та подальшим розрахунком міцності під час нагрівання було

створено схему, що представлена на рис. 5.8. Детальний опис елементів схеми приведено нижче. Трикутниками позначені ключові елементи, кружечками – основні, квадратами – допоміжні.



Рисунок 5.8. Детальна схема етапів проведення оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем за удосконаленою експериментально-розрахунковою методикою

На рис. 5.8 відображено етапи розрахунково-експериментальної методики оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, нижче наведено деталізацію позначень:

1. Виготовлення фрагменту плити. На цьому етапі виготовляють зразок сталезалізобетонної плити згідно із заданими геометричними параметрами, типом арматури та складом бетонної суміші. Необхідно дотримуватись умов твердіння, щоб забезпечити коректність подальших випробувань.

2. Встановлення фрагменту та засобів метрології. Фрагмент плити монтують у вогневу піч, забезпечуючи герметичність стиків. Встановлюють датчики та термопари в контрольних точках, дотримуючись затвердженої схеми розміщення.

3. Проведення експериментальних досліджень. Запускають вогневу установку та здійснюють нагрівання плити, фіксуючи показники температури в контрольних точках. Підтримують стандартну температуру пожежної кривої (або іншого обраного температурного режиму пожежі) упродовж визначеного часу випробування.

4. Результати експериментів. Систематизують дані про температурні поля в межах перерізу плити. Ці результати використовують як базу для побудови розрахункової моделі.

5. Підготовка розрахункової моделі. Створюють модель перерізу конструкції з урахуванням температурного впливу, який зафіксували під час експерименту. Визначають граничні умови та вводять вхідні дані у програмне середовище.

6. Проведення інтерполяції та розрахунок міцності. Виконують інтерполяцію температур у вузлових точках плити. Обчислюють зміни фізико-механічних властивостей матеріалів і проводять аналіз напруженого стану конструкції.

7. Розрахунок міцності за умов зовнішнього впливу. Оцінюють здатність конструкції витримувати розподілене навантаження в умовах дії високих

температур. Вони враховують втрати міцності матеріалів відповідно до норм [24, 25].

8. Результати щодо оцінювання межі вогнестійкості. Визначають граничний час, коли плита втрачає несучу здатність. Порівнюють ці значення з нормативними межами вогнестійкості для аналогічних конструкцій [27].

9. Висновки, рекомендації. На завершальному етапі формулюють основні висновки та, за необхідності, пропонують інженерні рішення для покращення вогнестійкості.

У даному розділі було розглянуто схему, в основі якої лежать 2 ключових, 7 основних та 7 додаткових елементів. Відповідно до вищеописаної удосконаленої схеми оцінювання межі вогнестійкості експериментально-розрахунковим шляхом можливо встановити фактичну межу вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем.

5.10. Висновки до розділу 5

1. У цьому розділі дисертаційного дослідження було розроблено покроковий алгоритм оцінювання межі вогнестійкості, що охоплює 9 етапів: від виготовлення зразка та встановлення датчиків до чисельного аналізу міцності. Запропоновано детальну схему реалізації методики (рис. 5.8), що базується на реальних експериментальних даних. Запропонована методика дозволяє більш ефективно, порівняно з існуючими, встановлювати межу вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем на основі врахування як особливостей матеріалів конструкції, так і прикладених до неї в процесі експлуатації механічних навантажень.

2. Обґрунтовано, розроблено та пояснено удосконалену схему виконання експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем з використанням малогабаритних вогневих печей для вирішення теплотехнічної задачі та подальшим розрахунком міцності під час нагрівання, яка складається з 2 ключових, 7 основних та 7

додаткових елементів. Схема передбачає виготовлення фрагмента визначених розмірів з матеріалів, які передбачено для виготовлення повномасштабних конструкцій, нагрівання у спеціальній малогабаритній вогневій установці та подальшого розрахунку міцності.

3. Доведено, що можливо та доцільно забезпечувати розміри досліджуваного фрагмента відповідно до габаритів та конфігурації малогабаритної вогневої установки, що мають перевищувати на 10 мм з кожної сторони задля забезпечення герметичності прилягання досліджуваного фрагмента до камери печі. Під час встановлення доцільно використовувати ущільнюючий негорючий м'який матеріал (наприклад, мінераловату).

4. Встановлено, що можливо створювати як спеціалізовані під плити конфігурацію установки так і універсальні, що за рахунок п-подібної форми камери вогневої печі допускають використання 1-ої або 2-ох знімних панелей. Універсальність може бути забезпечено улаштуванням 4-ох отворів для встановлення пальників, з можливістю змінювати їхнє розташування залежно від виду елемента конструкції. Для створення необхідного температурного режиму застосовуються два пальники, які розміщують в залежності від розміщення досліджуваного фрагменту: у верхній та нижній частинах протилежної стінки установки при вертикальному розміщенні або внизу камери печі – при горизонтальному. Пальники мають бути розташовані так, щоб факели полум'я не перетиналися між собою та знаходилися на відстані не менше 80 см від дослідного зразка. Отвори для пальників, які не використовуються (у разі наявності таких) під час випробування, необхідно щільно заповнити мінеральною ватою або іншим ущільнювачем для запобігання витоку пічних газів.

5. Виконано розрахунок залишкової несучої здатності сталезалізобетонної плити довжиною 6 м при розподіленому навантаженні 300 т·м після пожежного впливу протягом 60 хвилин. Встановлено, що ресурс становить 53 %, що підтверджує ефективність комбінованого підходу.

6. Визначено основні необхідні дані, які отримані експериментальним шляхом, такі, як температура на обігрівній, необігрівній поверхні, арматурі та

посередині перерізу плити; висота, товщина, товщина захисного шару досліджуваного фрагменту, клас міцності арматури та бетону, діаметри арматури, тип крупного заповнювача бетону, кількість та розташування стержнів, ці дані є вхідними даними для виконання розрахунку міцності сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем.

7. Встановлено, що для виконання перевірки адекватності доцільним є використання відносного відхилення F-критерію Фішера, з цією метою необхідно виконувати 3 ідентичні випробування, що підтвердить достовірність та стабільність отриманих результатів. Коли виконано більше двох експериментів, відповідно тоді можливо зробити статистичний аналіз, щоб оцінити рівень значущості відхилень між розрахунковими та експериментальними значеннями.

ВИСНОВКИ

У дисертації, яка є завершеним науковим дослідженням, представлено результати виконання актуального науково-практичного завдання щодо виявлення закономірностей нагрівання та втрати міцності сталезалізобетонними плитами з гофрованим профілем за умов пожежі як наукового підґрунтя для удосконалення експериментально-розрахункового методу такої оцінки. У результаті виконання поставлених у роботі наукових завдань, одержано такі основні висновки:

1. На основі аналізу сучасних методів оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем встановлено основні недоліки наявних підходів – високу вартість повномасштабних випробувань, обмежену точність чисельного моделювання без валідації та недостатнє врахування реальних температурних полів. На основі огляду обґрунтовано необхідність розроблення удосконаленої експериментально-розрахункової методики із застосуванням малогабаритних вогневих установок та подальших обчислень.

2. Обґрунтовано, що чисельне моделювання процесів тепломасообміну у сталезалізобетонних плитах з гофрованим профілем є ефективним засобом аналізу їхньої вогнестійкості в умовах пожежі. Проведено порівняльний аналіз CFD-програмних комплексів, зокрема FDS та FlowVision. Визначено переваги використання FlowVision для моделювання високотемпературних процесів у складних будівельних елементах завдяки підтримці мультифізичних процесів, інтеграції з CAD-системами та адаптивній побудові розрахункової сітки. Підвищено точність відтворення теплового впливу пожежі за рахунок локального згущення сітки до 4 мм у зонах пальників, що забезпечило стабільне моделювання температурних градієнтів у фрагменті плити у вогневій печі. Розроблено алгоритм побудови моделей, що дозволяє адекватно відтворювати прогрівання поверхні плит і створювати передумови для проведення експериментальних досліджень, враховуючи особливості реальної геометрії будівельних конструкцій.

3. Проведено експерименти з нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем розміром 1200×1200 мм у малогабаритній установці,

що засвідчили стабільність розподілу температур: температура арматури сягала 350 °С, на необігріваній поверхні – не перевищувала 45 °С. Повторюваність вимірювань підтверджено: середнє відхилення – 9,2 °С, відносно – до 4,1 %, що свідчить про ефективність розробленої у роботі методики проведення вогневих випробувань у малогабаритній установці. Обґрунтовано розташування пальників та термопар забезпечило зменшення кількості вимірювальної техніки на 33 % без втрати точності.

4. На основі отриманих експериментальних даних удосконалено методику оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, що відрізняється від існуючих зменшенням кількості місць контролю температури з 12 до 9 та не знижує точність за рахунок розробки схеми розміщення термопар, яка враховує неоднорідність матеріалу конструкції та особливості гофрованого профілю. Доведено, що випробування фрагментів у вертикальному положенні, що не впливає на точність отриманих результатів, а подальший розрахунок, що включає інтерполяцію температурного поля всередині конструкції на основі точкових експериментальних даних та розрахунок залишкової несучої здатності має достовірні результати. Виявлено закономірності втрати міцності сталезалізобетонними плитами з гофрованим профілем за умов пожежі. Встановлено, що плита довжиною 6 м при навантаженні 300 т·м зберігає 53 % міцності після пожежного впливу тривалістю 60 хвилин.

5. Розроблено алгоритм практичного застосування удосконаленої експериментально-розрахункової методики оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, який охоплює основні етапи підготовки зразків, проведення вогневих випробувань у малогабаритній печі, обробку та узагальнення температурних вимірювань, відновлення температурного поля в перерізі конструкції та подальший розрахунок залишкової несучої здатності з валідацією результатів. Обґрунтовано вимоги до геометричних параметрів фрагментів, конфігурації вогневої установки, розміщення пальників і засобів вимірювання, що забезпечує відтворюваність стандартного пожежного режиму та дозволяє знизити трудомісткість експериментів без втрати точності. Показано, що

запропонований алгоритм дає змогу на основі експериментальних даних оцінювати втрату міцності конструкції під час нагрівання. Зокрема встановлено, що після 60 хв. пожежного впливу плита довжиною 6 м при навантаженні 300 т·м зберігає близько 53 % несучої здатності. Підтверджено доцільність виконання щонайменше трьох повторних випробувань із використанням методів математичної статистики для перевірки адекватності отриманих результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Степаненко В. О. Дослідження впливу конфігурації малогабаритної вогневої установки на рівномірність нагрівання поверхні сталезалізобетонної плити. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. №2 (18). Київ, 2024. С. 4–12.
2. Нуянзін О. М., Іваненко О. І., Степаненко В. О., Самченко Т. В. Дослідження температурних режимів пожежі у горизонтальних кабельних тунелях в залежності від їхніх параметрів та пожежного навантаження. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Том 8. № 1. Черкаси, 2024. С. 139–150.
3. Іваненко О. О., Сідней С. О., Рудешко І. В., Іщенко І. І., Степаненко В. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по ребристій плиті при моделюванні пожежі. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Том 8. № 2. Черкаси, 2024. С. 121–132.
4. Степаненко В. О., Нуянзін О. М., Перегін А. В., Кришталь Д. О., Копитін Д. Е. Результати прогріву сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем під час теплового впливу пожежі. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. НУЦЗ України. №2 (40) Харків, 2024 С. 113–125.
5. Palchykov R., Ballo Y., Nizhnyk V., Mykhailov V., Gavryliuk A., Loik V., Synelnikov O., Synelnikov S., Stepanenko V., Nuianzin O. Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 132, No. 10. P. 37–45.
6. Fedchenko S., Nuianzin O., Stepanenko V., Vedula S. Modeling the Thermal Effects of Fire on Steel-Reinforced Concrete Slabs with a Corrugated Profile. *Key Engineering Materials*. 2025. T. 1028. С. 33–40.

7. Система захисту модульних укриттів від зіткнень з автотранспортом: пат. 160549 Україна. № 202405340; заявл. 12.11.2024; опубл. 17.09.2025, Бюл. № 38. 120 с.

8. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Кайдаш В. С., Дослідження рівномірності прогріву елементів залізобетонних будівельних конструкцій у малогабаритній вогневій установці. *«Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 59–60.

9. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Янішевський В. Е. Експериментальні дослідження з нагрівання залізобетонної плити у малогабаритній вогневій печі. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф.* Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 186–187.

10. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Експериментальне дослідження з нагрівання сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем. *«Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*: матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2024. С. 138–139.

11. Степаненко В. О. Метрологічна оцінка якості будівельних матеріалів для забезпечення безпеки техногенно небезпечних об'єктів. *«Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах»*: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2024. С. 106–108.

12. Степаненко В. О. Інноваційні будівельні матеріали: шлях до підвищення безпеки праці. *«Актуальні питання безпеки праці у контексті сталого розвитку та європейської інтеграції України»*: матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції Харків: Харківський

національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, 2024. С. 42–44.

13. Степаненко В. О. Забезпечення пожежної безпеки на об'єктах, що працюють з небезпечними хімічними речовинами. *«Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2025. С. 351–352.

14. Степаненко В. О. Аналіз ризиків пожежної безпеки на автомобільних транспортних засобах. *«Наукова весна»*: матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції, НТУ «Дніпровська політехніка», 2025. С. 52.

15. Степаненко В. О. Аналіз впливу зміни клімату на частоту техногенних аварій *«Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України»*: матеріали XI Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С.178–179.

16. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Янішевський В. Е. Особливості створення комп'ютерної моделі нагрівання сталезалізобетонної плити у малогабаритній вогневій печі, *«Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С.324–326.

17. Білик А., Сандлерс А., Беляєв М., Постернак О. Основи проектування сталезалізобетонних перекриттів багатопверхових автостоянок. *«Методичні рекомендації до практичних занять з дисципліни цільової підготовки»*. К.: УЦСБ, КНУБА, 2020. 80 с.

18. Підвищення ефективності випробувань на вогнестійкість горизонтальних елементів залізобетонних будівельних конструкцій: *дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: 21.06.02 – пожежна безпека*. Олександр Михайлович Нуянзін. Черкаси, 2014. 210 с.

19. Лозинський Р. Я., Веселівський Р. Б., Бричка В. Р. Дослідження вогнестійкості дерев'яних конструкцій. *Пожарна безпека*. 2019. № 17. С. 83–89.
20. Новак С., Новак М., Бедратюк О. Особливості оцінювання методів визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 2(8). С. 29–40.
21. Рудешко І. В., Березовський А. І., Дагіль В. Г. Вогнестійкість будівель із врахуванням зміни напруженого стану конструкцій під час пожежі. *Науковий вісник будівництва*. 2021. Т. 105, № 3. С. 45–52.
22. Орловський Ю., Шналь Т., Павлюк Ю. Підвищення вогнестійкості конструкцій будівель і споруд вогнезахисним покриттям. *Пожарна безпека*. 2021. № 2. С. 50–55.
23. Нуянзін О. М. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей. *Дис. ... д.т.н. : 21.06.02*, Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2023. 418 с.
24. ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1:2010 Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. *Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд* (EN 1994-1-1:2004, IDT).
25. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. *Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість* (EN 1993-1-2:2005, IDT).
26. ДСТУ EN 1363-1:2023 Випробування на вогнестійкість. *Частина 1. Загальні вимоги* (EN 1363-1:2020, IDT).
27. ДБН В.1.1-7-2016 «Пожарна безпека об'єктів будівництва. *Загальні вимоги*».
28. ДСТУ EN 1365-2:2023 Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. *Частина 2. Перекриття та покриття* (EN 1365-2:2014, IDT).
29. Перегін А. В. Удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим

профілем. Дис. ... д-р філософії : 261, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. 162 с.

30. ISO 834-1:2025. Fire-resistance tests – Elements of building construction – *Part 1: General requirements*. Geneva: International Organization for Standardization, 2025.

31. BS EN 1363-1:2020. Fire resistance tests. *General requirements*. London: British Standards Institution, 2020.

32. ASTM E119-24. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. *West Conshohocken*, PA: ASTM International, 2024.

33. BS 476-21:1987. Fire tests on building materials and structures. *Part 21: Methods for determination of the fire resistance of loadbearing elements of construction*. London: British Standards Institution, 1987.

34. DIN 4102-2:1977. Fire behaviour of building materials and building components. *Building components – Definitions, requirements and tests*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1977.

35. CAN/ULC-S101-14:2014. Standard Methods of Fire Endurance Tests of *Building Construction and Materials*. Ottawa: Underwriters' Laboratories of Canada, 2014.

36. AS 1530.4:2014. Methods for fire tests on building materials, components and structures. *Part 4: Fire-resistance tests for elements of construction*. Sydney: Standards Australia, 2014.

37. EN 13501-2:2023. Fire classification of construction products and building elements. *Part 2: Classification using data from fire resistance and/or smoke control tests*. Brussels: European Committee for Standardization, 2023.

38. Демчина Б. Г. Вогнестійкість одно- і багатошарових просторових конструкцій житлових та громадських будівель : дис. докт. техн. наук : 05.23.01. Київ : КиївЗНДІЕП, 2002. 367 с.

39. Шналь Т. М., Коваль М. С., Демчина Б. Г., Коваль П. М., Кархут І. І. Повномасштабні пожежні випробування фрагмента великопанельної будівлі.

Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2008. № 627. С. 208–212.

40. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій. *Львів : Видавництво Львівської політехніки*, 2010. 176 с.

41. Сідней С. О. Підвищення достовірності результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін : дис. ... канд. техн. наук. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2016. 161 с.

42. Поздєєв С. В., Отрош Ю. А., Омельченко А. М., Щіпець С. Д. Методика оцінки межі вогнестійкості залізобетонних балок шляхом інтерпретації результатів їх вогневих випробувань. *Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету*. 2014. № 1. С. 119–127.

43. 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.

44. Була С. С.; Бойко Р. О.; Горбачевський Р. Р. *Аналіз методів розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій*. Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво, 2012, 5: 54–59.

45. Lie T. T. Characteristic temperature curves for various fire severities. *Fire Technology*. 1974. Vol. 10. No. 4. P. 315–326.

46. Lie T. T. A procedure to calculate fire resistance of structural members. *International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety*. 1983. P. 139–153.

47. Shah T. M., Sadaf Siddiq, Koreshi Z. U. An analysis and comparison of tube natural frequency modes with fluctuating force frequency from the thermal cross-flow fluid in 300 MWe PWR. *International Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 9. No. 9. P. 201–205.

48. Поздєєв С. В., Тищенко О. М. Дослідження ефективності математичних моделей теплопередачі для розв'язку теплотехнічної задачі при визначенні вогнестійкості залізобетонних конструкцій. *Пожарна безпека: теорія і*

практика. Черкаси. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. 2010. Вип. 5. С. 122–129.

49. Поздєєв С. В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних плит. *Пожежна безпека: теорія і практика*. Черкаси. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. 2010. Вип. 6. С. 125–133.

50. Поздєєв С. В. Дослідження ефективності вогнезахисної обробки залізобетонних балок покриттями що спучуються. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2010. Т. 3. № 54. С. 12–16.

51. Поздєєв С. В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних балок. *Пожежна безпека*. Львів. ЛДУБЖД. 2010. Вип. 17. С. 115–122.

52. Поздєєв С. В. Дослідження адекватності результатів математичного моделювання тепломасообміну у вогневій печі при випробуваннях залізобетонної плити на вогнестійкість. *Пожежна безпека: теорія і практика*. Черкаси. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. 2010. Вип. 6/1. С. 60–65.

53. Поздєєв С. В., Левченко А. Д. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. *Науковий вісник Національного технічного університету Львівська політехніка*. 2011. С. 264–269.

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

55. Щіпець С. Д. Метод визначення температурних полів у перерізах несучих стін за результатами їх випробувань на вогнестійкість. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2014. № 1. С. 79–84.

56. Отрош Ю. А., Поздєєв С. В., Демешок В. В., Кропива М. О. Оцінка вогнестійкості ненесучих стін за розрахунковими методами Єврокоду. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2015.

57. Нуянзін О. М., Заїка П. І., Черниш Р. А., Ведула С. А. Розрахункова оцінка межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Т. 6. № 2. С. 82–94.
58. Нуянзін О. М., Діденко В. В. Уточнений метод розрахункової оцінки межі вогнестійкості залізобетонної плити. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси. 2019. С. 131–134.
59. Krukovsky P. G., Tadlya O. Yu. Identifiability of the parameters of the thermal regime model of a typical two-room apartment structure. *Industrial Heat Engineering*. 2007. No. 5. P. 54–63.
60. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD. La Canada. *DCW Industries*. 1998.
61. Baum H. R., McGrattan K. B. Simulation of large industrial outdoor fires. Fire Safety Science. Proceedings of the Sixth International Symposium. *International Association for Fire Safety Science*. 2000.
62. 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*. 2020. Т. 4. № 1. С. 71–79.
63. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. Fire Dynamics Simulator. *User's Guide*. NIST Special Publication 1019. 2013. 339 p.
64. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М. Математичні моделі теплообміну для удосконалення метрологічних особливостей вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість. *Пожежна безпека 2011 : Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків. НУЦЗ України. 2011. 372 с.
65. Осипенко В. І., Поздєєв С. В., Тищенко І. Ю. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур: *Навч. посіб.* Черкаси, 2012. 202 с.

66. Нуянзін О. М., Болжаларський К. В., Андрущенко А. В., Задорожний А. О. Застосування повної системи рівнянь Нав'є-Стокса для вирішення задач пожежної безпеки. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції Надзвичайні ситуації безпека та захист*. Черкаси, 2015. С. 109–111.
67. Немчинов, Ю. І., et al. (2014). *Дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій*. Наука та будівництво, 2, 11–16.
68. Bartelemi, B., Kryuppa, Zh. (1985). *Ognestoykost stroitelnykh konstruktsiy*. Stroyizdat.
69. Поздєєв, С.В., Левченко, А.Д. (2011). *Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій*. В *Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка»*. Львів: НТУ «Львівська політехніка», 264–269.
70. Поздєєв С. В., Словінський В. К., Щіпець С. Д.. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань. *Пожежна безпека: теорія і практика*. Черкаси, 2013. № 14, 88–93.
71. Сабірзянов Т. Г. Метод точного розрахунку константи рівноваги складної хімічної реакції. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. №. 24 (2). С. 54–59.
72. Бакін П. І. та ін. Визначення вогнестійкості будівельних конструкцій розрахунковими методами відповідно до стандартів, що впроваджують Єврокоди. *Світ геотехніки*. 2011. №. 1. С. 12–15.
73. Жолткевич Г. Г. Спеціальність 01.05.02. Математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки): дис. *Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*, 2021.

74. Поздєєв С.В. Розвиток наукових засад визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій: дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02. Поздєєв Сергій Валерійович. Черкаси, 2012. 360 с.
75. Нуянзін О. М., Болжаларський К. В., Андрущенко А. В., Задорожний А. О. Застосування повної системи рівнянь Нав'є-Стокса для вирішення задач пожежної безпеки. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції Надзвичайні ситуації безпека та захист*. Черкаси, 2015. С. 109–111.
76. Нуянзін О. М., Перегін А. В., Ребедь В. І. та ін. Основні параметри побудови комп'ютерної моделі кабельного тунелю в середовищі FDS. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації попередження та ліквідація»*. Черкаси: Черкаський інститут імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 255–257.
77. CONVERGE CFD Manual. Version 3.0. Madison, WI: Convergent Science, Inc., 2023. – 584 p.
78. Siemens. STAR-CCM+ User Guide. *Siemens Digital Industries Software*, 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://plm.sw.siemens.com>.
79. Altair Engineering Inc. *Altair CFD Documentation*. 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.altair.com>.
80. Loci/CHEM CFD Solver. *NASA Langley Research Center*, 2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://software.nasa.gov/software/LAR-18070-1>.
81. EDF. Code_Saturne: General documentation. Version 7.0. *Électricité de France*, 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.code-saturne.org>.
82. Computational Industry Technologies. Kameleon FireEx (KFX). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.inocus.no>.
83. Gexcon. FLACS User's Manual. Version 10.10. *Gexcon AS*, 2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.gexcon.com>.

84. Amsden, A.A., O'Rourke, P.J., Butler, T.D. KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines. *Los Alamos National Laboratory Report LA-13313-MS*, 2000.
85. SU2 Code Developers. SU2: *Open-Source CFD Code*. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://su2code.github.io>.
86. Permann C.J., Gaston D.R., Andrš D. та ін. MOOSE: Enabling massively parallel multiphysics simulation. *SoftwareX*, 2020, Vol. 11, 100430.
87. Nuianzin O. et al. Study of the thermal effect of fire on fragments of reinforced concrete columns based on the results of experimental tests. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2024. №. 112. P. 202–208.
88. Перегін А. В., Нуянзін О. М. Етапи створення прототипу вогневої установки для визначення температурних розподілів малогабаритних фрагментів залізобетонних конструкцій. *«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування»*. Зб. наук. праць. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. Т.5. № 2. С. 75–82.
89. Нуянзін О. М., Борисова А. С. Розрахункове оцінювання межі вогнестійкості залізобетонної плити за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. *Цивільна безпека: державне управління та антикризовий менеджмент*. Київ: ІДУНДЦЗ, 2023. №. 1(2). С. 25–40.
90. Стороженко Л.І., Іванюк А.В., Клестов О.В. Експериментальні дослідження сталезалізобетонних плит з армуванням ребер вертикальними сталевими листами. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава : ПолтНТУ, 2012. Вип. 3(33). С. 249–255. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/8468>
91. Некора, В. С., Сідней, С. О., Некора, О. В., Шналь, Т. М. Поведінка сталезалізобетонної плити при пожежі. *Проблеми надзвичайних ситуацій: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 34–35.
92. ДБН В.2.6-160:2010 Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. *Основні положення*. Зі Зміною № 1.

93. ДСТУ 2272:2006 Пожежна безпека. *Терміни та визначення основних понять*.
94. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні.
95. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. *Основні положення*. Зі Зміною № 1.
96. Перегін А. В. Дослідження впливу конфігурації та параметрів вогневих печей на умови нагрівання несучих стін за стандартним температурним режимом пожежі. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування: зб. наук. праць. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. Т.6, № 2. С. 85-94.
97. Nuianzin O.M., Kozak A.A., Yanishevskyi V.E., Kryshstal V.M. Study of the thermal effect of fire on fragments of reinforced concrete columns based on the results of experimental tests. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-andtechnical collected articles*. K.: KNUBA, № 112. 2024. P. 202-208.
98. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)) 2022. P. 53–61.
99. Kovalov A., Otrosh Y., Poklonskyi V., Semkiv O. & Tomenko M. Research of fire resistance of fire protected reinforced concrete structures. *Trans Tech Publications Ltd. In Materials Science Forum*. 2022. Volume 1066. P. 224–232.
100. Shivam Sharma, Varun Teja Vaddamani, Anil Agarwal. Insulation effect of the concrete slab-steel deck interface in fire conditions and its influence on the structural fire behavior of composite floor systems *Fire Safety Journal*. April 2019. 1 Volume 105. P. 79-91.
101. Nekora, V., Pozdieiev, S., Nekora, O., Fedchenko, S., Nignyk, V., Novhorodchenko, A., Shnal, T. Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (133)) 2025. P. 52–61.
102. Kovalov, A. , YOtrosh, Y., Chernenko, O., Zhuravskij, M., Anszczak, M. Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in ansys

under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. *Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. Materials Science Forum Submitted*. Forum. Vol. 1038. P. 514–523

103. Haldinov, M., Peshko, V., Rindyuk, D., Chernousenko, O., & Lementar, S. (2018). CFD-simulation of the pyrolysis process of high-temperature decomposition of raw materials of plant origin in household solid-fuel boilers. *Scientific Works of NUFT* 2018. Volume 24. Issue 2.

104. ДСТУ EN 1992-4:2022 Єврокод 2. Проектування бетонних конструкцій. Частина 4. Проектування кріплень для використання в бетоні (EN 1992-4:2018, IDT).

105. ДСТУ CEN/TR 17231:2022 Єврокод 1. Вплив на конструкції. Транспортні навантаження на мости. Взаємодія колії та мосту (CEN/TR 17231:2018, IDT).

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію
результатів дисертації

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Степаненко В. О. Дослідження впливу конфігурації малогабаритної вогневої установки на рівномірність нагрівання поверхні сталезалізобетонної плити. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. №2 (18). Київ, 2024. с. 4-12. <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/download/245/179>
2. Нуянзін О. М., Іваненко О. І., Степаненко В. О., Самченко Т. В. Дослідження температурних режимів пожежі у горизонтальних кабельних тунелях в залежності від їхніх параметрів та пожежного навантаження. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Том 8. № 1. Черкаси, 2024. С. 139–150. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/200/191>
3. Іваненко О. О., Сідней С. О., Рудешко І. В., Іщенко І. І., Степаненко В. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по ребристій плиті при моделюванні пожежі. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Том 8. № 2. Черкаси, 2024. С. 121-132. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/issue/view/210>
4. Степаненко В. О., Нуянзін О. М., Перегін А. В., Кришталь Д. О., Копитін Д. Е. Результати прогріву сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем під час теплового впливу пожежі. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. НУЦЗ України. №2 (40) Харків, 2024 С. 113 – 125. <http://pes.nuczu.edu.ua/uk/arkhiv-nomeriv/11-ua-cat/455-stepanenko-v-o-nuyanzin-o-m-peregina-a-v-krishtal-d-o-kopitin-d-e-rezultati-progrivu-stalezalizobetonnikh-plit-z-gofrovanim-profilem-pid-chas-teplovogo-vplivu-pozhezhi>
5. Palchykov R., Ballo Y., Nizhnyk V., Mykhailov V., Gavryliuk A., Loik V., Synelnikov O., Synelnikov S., Stepanenko V., Nuianzin O. Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 132, No. 10. P. 37-45. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/317332>

6. Fedchenko S., Nuianzin O., Stepanenko V., Vedula S. Modeling the Thermal Effects of Fire on Steel-Reinforced Concrete Slabs with a Corrugated Profile //Key Engineering Materials. 2025. T. 1028. C. 33-40. <https://www.scientific.net/KEM.1028.33>

Апробація матеріалів дисертації:

1. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Кайдаш В. С., Дослідження рівномірності прогріву елементів залізобетонних будівельних конструкцій у малогабаритній вогневій установці. *«Надзвичайні ситуації: безпека та захист»:* матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 59-60. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21190>

2. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Янішевський В. Е. Експериментальні дослідження з нагрівання залізобетонної плити у малогабаритній вогневій печі. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф.* Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 186–187. http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22059/1/Nuianzin_2024_TPGPLNS_3_85.pdf

3. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Експериментальне дослідження з нагрівання сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем. *«Надзвичайні ситуації: безпека та захист»:* матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2024. С. 138-139. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21325>

4. Степаненко В. О. Метрологічна оцінка якості будівельних матеріалів для забезпечення безпеки техногенно небезпечних об'єктів. *«Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах»:* матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених Харків:

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2024. С. 106-108. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22299>

5. Степаненко В. О. Інноваційні будівельні матеріали: шлях до підвищення безпеки праці. *«Актуальні питання безпеки праці у контексті сталого розвитку та європейської інтеграції України»*: матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, 2024. С. 42-44. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22311>

6. Степаненко В. О. Забезпечення пожежної безпеки на об'єктах, що працюють з небезпечними хімічними речовинами. *«Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2025. С.351-352. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25660>

7. Степаненко В. О. Аналіз ризиків пожежної безпеки на автомобільних транспортних засобах. *«Наукова весна»*: матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С.52. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25703>

8. Степаненко В. О. Аналіз впливу зміни клімату на частоту техногенних аварій *«Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України»*: матеріали XI Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С.178-179. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25704>

9. Нуянзін О. М., Степаненко В. О., Янішевський В. Е. Особливості створення комп'ютерної моделі нагрівання сталезалізобетонної плити у малогабаритній вогневій печі, *«Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С.324-326. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25700>

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича компанія «Спецзахист»
 Денис ЛЮБЧЕНКО
 «30» вересня 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертації на здобуття наукового ступеня
 доктора філософії за спеціальністю «Пожежна безпека»
 Степаненка Віталія Олександровича

Цей акт складено про те, що результати досліджень, представлених у дисертації Степаненка Віталія Олександровича на тему «Удосконалення методу оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем», може бути застосовано у роботі ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича компанія «Спецзахист».

Результати проведених досліджень мають практичну цінність у розрізі розроблених удосконалень щодо процесу проведення та оцінки на вогнестійкість сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, що застосовують, зокрема, під час будівництва об'єктів критичної інфраструктури та захисних споруд цивільного захисту. Ці вдосконалення стосуються поєднання експериментальних та розрахункових методів визначення вогнестійкості та здатне зменшити затрати у порівнянні з випробуваннями на вогнестійкість будівельних конструкцій. Даний напрямок є перспективним для розвитку діяльності підприємства.

Заступник директора
 ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича
 компанія «Спецзахист»

«30» вересня 2025 р.



Роман СОВГІРЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Тимчасово виконуючий обов'язки
начальника 3 Спеціального центру
швидкого реагування ДСНС України
полковник служби цивільного захисту

Віталій ВОРОНА

«02» 11.2010

2015 року

АКТ**впровадження результатів дисертації
Степаненка Віталія Олександровича****«Удосконалення методу оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з
гофрованим профілем»**

Заступник начальника центру з оперативного реагування Янішевський В. Е., заступник начальника центру з матеріально-технічного забезпечення Стефанчук І. М. та заступник начальника центру Калініченко Р. В. склали цей акт про те, що результати дисертації доцільно використовувати під час оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем, що сприятиме підвищенню достовірності оцінки пожежної безпеки та поширенню таких конструкцій у сучасному будівництві.

За результатами проведених досліджень розроблено та апробовано алгоритм практичного застосування удосконаленої експериментально-розрахункової методики, включаючи підготовку зразків, проведення випробувань, обробку даних інтерполяції, розрахунок міцності та валідацію точності результатів на основі порівняння з науковими джерелами та експериментальними даними.

Заступник начальника центру
з оперативного реагування

Вадим ЯНІШЕВСЬКИЙ

Заступник начальника центру
з ресурсного забезпечення

Ігор СТЕФАНЧУК

Т.в.о. заступника начальника центру

Руслан КАЛІНІЧЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор з навчальної роботи
Національного університету цивільного
захисту України



Львівський факультет служби цивільного захисту
кандидат технічних наук, доцент

Олександр ДЖУЛАЙ

АКТ

про впровадження в навчальний процес
Національного університету цивільного захисту України
результатів дисертації
СТЕПАНЕНКА Віталія Олександровича
«Удосконалення методу оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит з
гофрованим профілем»
представленої на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Комісія у складі: начальника навчально-методичного центру, к. т. н., доцента Дядюшенко О.О., начальника навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, к. т. н., доцента Мельника В.П., начальника кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій, к. т. н., доцента Березовського А.І. склала даний акт про те, що результати дисертації Степаненка В. О. впроваджено в навчальний процес при здійсненні підготовки фахівців для ДСНС України за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» на першому рівні вищої освіти («бакалавр») під час вивчення дисципліни «Матеріалознавство та технологія матеріалів» в практичне заняття за темою «Визначення характеристик міцності бетону, визначення характеристик міцності арматури, вивчення технології виготовлення залізобетонних конструкцій. Фортифікаційні модульні захисні споруди» (Протокол кафедри № 17 від 19.11.2025 р.).

У дисертації представлено вирішення актуальної науково практичної задачі гарантування межі вогнестійкості несучих будівельних конструкцій у випадку пожежі.

Впровадження результатів дисертації Степаненка В. О. в навчальний процес створює передумови для підвищення якості підготовки фахівців у галузі будівництва, пожежної безпеки та цивільного захисту. Застосування результатів наукової роботи забезпечує можливість більш глибокого

вивчення процесів, пов'язаних із вогнестійкістю сталезалізобетонних конструкцій з гофрованим профілем

Впровадження результатів дисертації забезпечує актуальний і прикладний характер освіти, дозволяє підвищити якість підготовки здобувачів вищої освіти завдяки використанню напрацювань автора у процесі викладання дисципліни. Це сприяє формуванню в здобувачів вищої освіти практичних навичок проведення розрахунків пов'язаних із оцінкою вогнестійкості конструкцій, опором матеріалів, будівельними конструкціями, пожежною безпекою будівель і споруд.

Начальник
навчально-методичного центру
кандидат технічних наук, доцент



Олександр ДЯДЮШЕНКО

Начальник навчально-наукового
інституту пожежної та техногенної
безпеки,
кандидат технічних наук, доцент



Валентин МЕЛЬНИК

Начальник кафедри
пожежної і техногенної безпеки
об'єктів та технологій
кандидат технічних наук, доцент



Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ