

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

ШНАЛЬ ТАРАС МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 624.012

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ
ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА УМОВ ВПЛИВУ
ПАРАМЕТРИЧНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ПОЖЕЖ**

Спеціальність 21.06.02 – пожежна безпека

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Поздєєв Сергій Валерійович, Черкаський інститут
пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту
України, м. Черкаси, головний науковий
співробітник.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бєліков Анатолій Серафимович, Придніпровська
державна академія будівництва й архітектури,
м. Дніпро, завідувач кафедри безпеки
життєдіяльності;

доктор технічних наук, професор
Ковалишин Василь Васильович, Львівський
державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, завідувач кафедри пожежної тактики та
аварійно-рятувальних робіт;

доктор технічних наук, професор
Шмуkler Валерій Самуїлович, Харківський
національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова, м. Харків, завідувач кафедри
будівельних конструкцій.

Захист відбудеться «5» грудня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94 та на сайті Національного університету цивільного захисту України за електронною адресою: <http://nuczu.edu.ua>

Автореферат розісланий «4» листопада 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01



А.О. Михайлюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Статистичні дані щодо пожеж в Україні та за кордоном за останні п'ять років свідчать, що не існує помітної тенденції до зниження їх кількості, крім цього, за цей період спостерігалася істотна кількість масштабних пожеж, що призвели до катастрофічних наслідків. Причому, за означений період такі пожежі виникали у багатьох країнах на різних континентах і соціальні втрати від них складали у кожному окремому випадку від декількох десятків до декількох сотень людей. Прямі матеріальні втрати, наприклад, щорічно в Україні у середньому складають більше 1.5 млрд. грн. Хоча соціально-економічні витрати, безумовно, пов'язані із руйнуванням конструкцій унаслідок пожежі, проте, тільки четверта частина пожеж супроводжується частковим або повним руйнуванням конструкцій.

У випадках коли пожежі супроводжуються обваленням будівельних конструкцій, соціально-економічні втрати сягають найбільшого обсягу. При невідповідності нормам будівельних конструкцій за умов дефіциту їх вогнестійкості створюються передумови для підвищення небезпеки при евакуації людей, при проведенні робіт рятувальними підрозділами, тощо. Тому гарантування відповідності вогнестійкості будівельних конструкцій вимогам норм є необхідною умовою пожежної безпеки будівельних об'єктів.

При появі необґрунтованого профіциту вогнестійкості існує ризик необґрунтовано великих витрат при зведенні будівель та споруд. Встановлення ресурсу вогнестійкості в реальних умовах перебігу пожежі дозволяє зменшити витрати на зведення будівель на 1.5 – 2 % від їх загальної собівартості. Тож дослідження спрямовані на підвищення точності оцінок фактичної вогнестійкості будівельних конструкцій має достатнє соціальне та економічне підґрунтя щодо їх актуальності.

Дослідженням щодо експериментальної та розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій присвячені роботи А.С. Белікова, В.П. Бушева, О.І. Голоднова, Б.Г. Демчини, В.О. Каледина, В.В. Ковалишина, П.Г. Круковського, А.Ф. Милованова, С.В. Поздєєва, В.А. Пчелінцева, В.М. Ройтмана, В.Л. Страхова, М.М. Семерака, С.Л. Фоміна, В.С. Шмуклера, А.І. Яковлева, В. Bartelemi, D. Bernhart, L. Bisby, A. Buchanan, T. Harmathy, V. Kodur, G. Kruppa, T. Lie, T. Lennon, M. Schäfer, та інших дослідників. При існуючих підходах до оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій – експериментального та розрахункового, перспективним для підвищення їх точності є використання температурних режимів пожежі, наближених до реальних.

Розвиткові підходу де використовується реальні температурні режими для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій присвячені роботи І.М. Абдуррагімова, О.Є. Басманова, Б.Г. Демчини, П.Г. Круковського, А.Д. Кузика, В.В. Ковалишина, Ю.А. Кошмарова, І.С. Молчадського, С.В. Пузача, А.М. Рижова, В.Л. Страхова, N.P. Bryner, D. Carpenter, G. Cox, A.M. Christensen, D. Drysdale, K. Hill, G. Heskestad, S. Kumar, D. Madrzykowski, K.B. McGrattan, K. Pericleous та ін. У даних підходах пропонуються велика кількість різних

методів розрахунку реальних температурних розподілень у приміщеннях із пожежами у контексті розгляду температури як окремого небезпечного фактору пожежі. При цьому зв'язок температурного впливу пожеж із реальними температурними режимами на будівельні конструкції вивчені недостатньо.

Основним проблемним питанням при аналізі задач, що мають бути вирішені при розрахунковій оцінці вогнестійкості, є їх взаємне пов'язування на рівні початкових умов та основних положень розрахунку з метою досягнення конкретного результату – відповідності того чи іншого елемента вимогам щодо його класу вогнестійкості, при цьому відсутня можливість комплексного врахування наявності автоматичних систем протипожежного захисту, вентиляції, типу пожежного навантаження.

Ще одним проблемним питанням за умов застосування даного підходу є необхідність послідовного виконання даних етапів за відсутності можливості використання загальних математичних співвідношень для отримання кінцевого результату. Закономірності, що встановлюють взаємозв'язок між параметрами приміщень із пожежами та вогнестійкістю будівельних конструкцій, змогли б суттєво підвищити продуктивність розрахунків, а саме забезпечити більшу точність та достовірність.

Усунення вказаних недоліків підходу розрахункової оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій на основі температурних режимів пожеж, наближених до реальних, дозволяє вирішити актуальну науково-технічну проблему, пов'язану із отриманням достовірних і надійних даних за допомогою розрахункових методів із суттєвим зниженням жорсткості вимог до вогнестійкості будівельних конструкцій і як наслідок - зменшення витрат на заходи щодо її забезпечення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота проводилася відповідно до «Концепції Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011—2015 роки», затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2010 р. № 2348-р та «Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012-2015 роки», затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 01.06.2012 р. № 590, у рамках виконання науково-дослідної роботи в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Методика розрахунку класу вогнестійкості монолітних залізобетонних конструкцій» (номер державної реєстрації 0115U000980), в якій здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження – розкриття закономірностей впливу параметрів, що характеризують геометрію приміщень із пожежею, пожежне навантаження, наявність вентиляції та автоматичних систем пожежогасіння на характеристики елементів будівельних конструкцій, пов'язаних із їх здатністю зберігати свої кондиції під впливом пожежі як наукового підґрунтя щодо розвитку основ розрахункової оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій в умовах пожеж із параметричними режимами.

Основні задачі дослідження:

1. Провести аналіз методів розрахункової оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій за умов температурного впливу пожежі, наближеного до реального, та системи нормування умов застосування таких методів.

2. Обґрунтувати математичні моделі для дослідження впливу температурних режимів пожеж, наближених до реальних, в умовах конкретних будівельних об'єктів на характеристики елементів будівельних конструкцій, пов'язаних із їх здатністю зберігати свої кондиції під впливом пожежі.

3. Обґрунтувати методики експериментів щодо дослідження теплових процесів у приміщеннях із пожежами для верифікації запропонованих математичних моделей з дослідження впливу температурних режимів пожеж, наближених до реальних, в умовах конкретних будівельних об'єктів на характеристики елементів будівельних конструкцій, пов'язаних із їх здатністю зберігати свої кондиції під впливом пожежі.

4. Провести комплекс експериментальних досліджень для визначення впливу температурних режимів пожеж, наближених до реальних, в умовах конкретних будівельних об'єктів на характеристики елементів будівельних конструкцій, пов'язаних із їх здатністю зберігати свої кондиції в умовах пожежі і на основі цього виявити відповідні закономірності і розробити математичні моделі цього впливу.

5. Провести комплекс чисельних експериментів на шляхом математичного моделювання пожеж за допомогою методів комп'ютерної газогідродинаміки у приміщеннях і на основі цього оцінити вплив факторів статистичної похибки експерименту, масштабу, наявності автоматичних систем пожежогасіння та систем штучної вентиляції на результати визначення температурних режимів пожеж за запропонованими математичними моделями.

6. Розробити математичні моделі для оцінки вогнестійкості елементів залізобетонних, сталевих, дерев'яних та конструкцій на основі виявлених закономірностей впливу параметрів теплових процесів пожежі, наближених до реальних, на характеристики елементів будівельних конструкцій, пов'язаних із їх здатністю зберігати свої кондиції під впливом пожежі, та створення на їх основі методик розрахунків вогнестійкості елементів будівельних конструкцій за таких умов.

7. Оцінити адекватність результатів, отриманих за допомогою запропонованих методів оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій за умов теплових впливів пожеж, наближених до реальних.

8. Розробити рекомендації щодо застосування запропонованих методик щодо оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій за умов теплових впливів пожеж, наближених до реальних.

Об'єктом дослідження є поведінка елементів залізобетонних, сталевих та дерев'яних будівельних конструкцій та їх здатність зберігати свої кондиції під впливом пожежі із параметричним режимом, залежним від параметрів приміщень, таких як пожежне навантаження, їх геометрія, наявність систем автоматичного пожежогасіння та штучної вентиляції, як підґрунтя щодо більш точної розрахункової оцінки вогнестійкості даних будівельних конструкцій.

Предмет дослідження – зв'язок параметрів приміщень із пожежею, таких як пожежне навантаження, їх геометрія, наявність систем автоматичного пожежогасіння та штучної вентиляції, з характеристиками щодо здатності елементів залізобетонних, сталевих, дерев'яних будівельних конструкцій зберігати свої кондиції, як основа для розвитку методів розрахункової оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій за умов параметричних режимів пожеж.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження теплообміну у приміщеннях із пожежею та термосилового відклику елементів будівельних конструкцій на тепловий вплив пожежі проводилися за допомогою систем диференціальних рівнянь неперервних середовищ типу рівнянь Нав'є-Стокса у числовій реалізації за методом кінцевих різниць і методу контрольних об'ємів, рівняння нестационарної теплопровідності у числовій реалізації за методом кінцевих різниць, а також напружено-деформованого стану в елементах будівельних конструкцій в умовах нагріву під час пожежі у числовій реалізації за методом кінцевих елементів та за методом деформаційних моделей. Також дослідження теплообміну у приміщеннях із пожежею проводилися на основі проведення експериментів на фізичних моделях таких приміщень. Для обробки експериментальних даних та верифікації результатів теоретичних досліджень були застосовані методи математичної статистики. Для побудовання математичних моделей закономірностей впливу параметрів теплових процесів пожежі, наближених до реальних, на параметри термосилового відклику елементів конструкцій був використаний регресійний аналіз.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розкритті закономірностей зв'язку параметрів, що характеризують геометрію приміщень із пожежею, пожежне навантаження, наявність вентиляції та автоматичних систем пожежогасіння на характеристики елементів будівельних конструкцій, пов'язаних із їх здатністю зберігати свої кондиції під впливом пожежі і їх реалізації у вигляді математичних моделей, який слугують основою для розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за умов впливу пожеж, наближеного до реального. При цьому **вперше**:

- встановлені математичні співвідношення що описують залежності максимальної середньооб'ємної температури пожежі від коефіцієнту прорізів та питомого пожежного навантаження;
- встановлено коефіцієнти безпеки, масштабні коефіцієнти при визначенні максимальної середньооб'ємної температури, часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури та тривалості пожежі;
- виявлені закономірності впливу наявності систем автоматичного пожежогасіння та систем вентиляції на параметри температурного режиму пожежі при її різних умовах які враховані при обґрунтуванні відповідних коефіцієнтів у вирази для визначення максимальної середньооб'ємної температури, часу її досягнення та тривалості пожежі;
- встановлено, що при значеннях питомого пожежного навантаження менше за 600 МДж/м^2 існує ділянка, на якій настання граничного стану для елементів сталевих конструкцій не спостерігається;

- встановлені закономірності впливу параметрів приміщень із пожежею на максимальну швидкість обуглювання та максимальний час процесу обуглювання і на основі отриманих регресійних моделей розроблена розрахункова методика оцінки межі вогнестійкості згинаних елементів дерев'яних конструкцій;
- виявлені закономірності граничних пластичних моментів для монолітних залізобетонних плит, балок та колон, на основі чого встановлено, що граничні пластичні моменти, визначені за розрахованими температурними режимами пожежі за запропонованими математичними моделями втричі менші за моменти, отримані за умови теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Набуло подальшого розвитку:

- застосування номограмних розрахункових методів оцінки вогнестійкості елементів сталевих будівельних конструкцій за умов впливу пожежі із температурним режимом, наближеним до реального;
- застосування стандартних методів розрахункової оцінки вогнестійкості елементів дерев'яних та залізобетонних конструкцій із застосуванням параметричних режимів пожежі.

Удосконалено:

- науково-методичну базу забезпечення нормованої вогнестійкості будівельних конструкцій з врахуванням параметрів, що характеризують реальний перебіг пожежі;
- методичну та експериментальну базу дослідження теплового впливу пожеж на будівельні конструкції.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується логічним викладенням та відповідністю поставлених для досягнення визначеної мети досліджень і завдань і методів їх розв'язання, заснованих на загально визнаних методах наукових досліджень; застосуванням методів теорії теплопровідності та механіки деформованого твердого тіла, регресійного аналізу, поліноміальної та експоненціальної апроксимації і найменших квадратів, а також теорії математичної статистики. Максимальне значення відносної похибки між отриманими експериментальними та розрахованими даними при визначенні температурних розподілів і меж вогнестійкості не перевищує 15 %, критерій Фішера не перевищує табличних значень при рівні значущості 0.05. Усі припущення, прийняті у роботі, а також результати досліджень не суперечать законам тепломасообміну, механіки та відповідають сучасним фізичним уявленням про досліджувані процеси.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у створенні наукових основ для розробки методичної бази щодо розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за умов впливу пожежі із температурним режимом, наближеним до реального, що дозволяє обґрунтувати використання існуючих проектних рішень без передбачення систем вогнезахисту. За рахунок цього має суттєве скорочення витрат, враховуючи, що вартість робіт щодо облаштування вогнезахисту у середньому складає 1.5 % - 2 % від загальної вартості всього будівництва. Розроблена методична база може бути підґрунтям щодо удосконалення системи

норм та стандартів для проектування вогнестійких будівельних конструкцій із гнучким підходом з врахуванням специфіки досліджуваних об'єктів будівництва.

Результати проведених досліджень використані при розробці шести державних стандартів України:

1. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 «Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT).

2. 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).

3. ДСТУ-Н Б EN 1999-1-2:2010 «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1999-1-2:2007, IDT)».

4. ДСТУ-Н Б EN 1994-1-2:2010 «Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1994-1-1:2004, IDT)».

5. ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:2010 «Єврокод 6. Проектування кам'яних конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1996-1-2:2005, IDT)».

6. ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2010 «Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, IDT)».

Розроблені методики апробовані та впроваджені у діяльність Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту (акт впровадження від 14.03.2019), департаменті запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України (акт впровадження від 26.03.2019), при здійсненні проведенні експертиз будівельних об'єктів приватного малого підприємства «Вогнеборець» м. Львів (акт впровадження від 17.04.2019), у викладанні фахових дисциплін у Національному університеті «Львівська політехніка» (акт впровадження від 24.04.2019).

Результати дисертаційної роботи втілено в розробку трьох патентів України на корисну модель щодо прогнозування температурних режимів пожеж при створенні вогнезахисних покриттів, забезпечення вогневих випробувань конструкцій та способу тепловізійних досліджень температури при пожежі.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової проблеми у сфері пожежної безпеки, мети та завдань дослідження, об'єкту та предмету досліджень. Автором особисто проаналізовані наукові роботи та нормативна література, що входить основну базу посилань та цитувань з теми роботи, розробці методичної основи щодо експериментальних і теоретичних досліджень, безпосередньому отриманні, опрацюванні та обробці результатів експериментальних і теоретичних досліджень, а також формулюванні висновків. Автор особисто організовував та брав участь у підготовці та проведенні всіх експериментальних та теоретичних досліджень.

Всі положення, винесені на захист та результати їх застосування наведено в роботах [1 – 49]. Особистий внесок здобувача в працях, які написані у співавторстві, полягає в наступному: у [1, 2] виконано проведення експериментів та обробка результатів досліджень вогнестійкості металевих конструкцій

захищених спучуваним покриттям; у [3] були проведена робота щодо виготовлення дослідних зразків, підготовки і проведення досліджень та обробка результатів дослідження теплофізичних характеристик спучуваного покриття; у роботі; у [4] було виконано роботу щодо проведення аналізу літератури, визначення мети роботи та аналіз результатів експериментів; у [5] було виконано роботу щодо проведення аналізу літератури, формулювання мети роботи та обґрунтування використання спучуваних покриттів для підвищення пожежної безпеки будівель та споруд; у [7] здійснено теоретичний аналіз можливості застосування вогнезахисного покриття для підвищення вогнестійкості теплоізоляції із пінопласту; у [6] виконано проведення експериментів та обробка результатів досліджень по вогнезахисту залізобетонних конструкцій захищених спучуваними покриттями; у [8] було виконано роботу щодо проведення аналізу літератури, формулювання мети роботи; у [9, 10] описана методика виготовлення дослідних зразків, підготовка та обробка результатів дослідження деструкції вогнезахисних покриттів; у [11] здійснено теоретичний аналіз термічної деструкції полімерних композитів; у [12, 15] було виконано роботу щодо проведення аналізу літератури, визначення мети роботи та аналіз результатів експериментів по підвищенню вогнестійкості конструкцій будівель; у [13, 16] було здійснено теоретичний аналіз технічної діагностики конструкцій після пожежі; у [14] було здійснено теоретичний аналіз якості результатів випробувань у запропонованій печі при використанні параметричних режимів пожеж; у [17] було виконано роботу щодо проведення аналізу стану залізобетонних конструкцій після впливу тривалого високотемпературного навантаження; у [18, 22] виконано проведення експериментів та отримана обробка результатів досліджень температурних режимів розвитку пожеж; у [19, 23] було здійснено роботу щодо створення методики експериментів і взято участь у проведенні експериментів по дослідженню температурних режимів розвитку пожеж а також при формулюванні висновків; у [20, 21] було здійснено теоретичний аналіз розвитку та моделювання пожежі за умов параметричних режимів, наближених до реальних; у [24, 25] виконано проведення експериментів та обробка результатів досліджень температурних режимах пожеж наближених до реальних, формулювання висновків по роботі; у [26, 27] здійснено аналіз можливості застосування комплексної методика оцінки термічних параметрів дії вогневого навантаження на конструкції; у [28, 29] виконано проведення експериментів та обробка результатів досліджень роботи залізобетонних балок; у [30, 31] було виконано роботу щодо проведення аналізу попередніх досліджень, формулювання мети дослідження та обробки результатів експериментів; у [32, 33] було здійснено обґрунтування параметрів складів вогнезахисного покриття; у [34] було здійснено обґрунтування конструктивних параметрів печі для випробувань; [35] було здійснено обґрунтування методики проведення тепловізійних вимірювань температури із використанням термоконтрастних елементів; у [36, 37] виконано проведення експериментів та обробка результатів досліджень по оцінці вогнестійкості конструкцій; у [38, 39] було проведено роботу по підготовці та здійсненню експерименту по впливу режиму пожежі на вогнестійкість захищених конструкцій; у [40, 41] було здійснено теоретичний аналіз якості результатів випробувань при вивченні впливу пожежі на залізобетонні конструкції; у [42, 43]

проведено підготовку експериментів та аналіз результатів дослідження по тріщиноутворення при впливі високих температур; у [44] було проведено роботу по проведенню експерименту по тріщиностійкості залізобетонних конструкцій при впливі пожежних навантажень; у [45] виконано проведення експериментів та обробка результатів дослідження вогнестійкості сірчаних композитів; у [46] було виконано формулювання задач та обробки результатів досліджень; у [47, 48] було здійснено обґрунтування параметрів моделей приміщень із пожежею; у [49] здійснено роботу щодо створення методики експериментів і прийнято участь у проведенні експериментів по вимірюванні температур у закритих об'ємах а також формулюванні висновків.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних та національних наукових конференціях: 6-й Міжнародній конференції «6th the International Scientific Conference» м. Кошице, Польща, 1997; Міжнародній конференції "Concrete and concrete structures". – Жіліна, Словаччина, 1999; IV Міжнародній конференції «Fourth international conference on steel and aluminium structures ICSAS'99». Хелсінкі, Фінляндія, 1999; V Міжнародній конференції «V Konferencja Naukowa Rzeszowsko-Lwowsko-Koszycska: Aktualne Problemy Budownictwa i Inzynierii Srodowiska», Ржешув, Польща, 2000; XII Міжнародна конференція «XII konferencja naukowo-techniczna "Kontra'2000". Durability of buildings and protection against corrosion» Варшава-Закопане, Польща, 2000; 9-тій Міжнародній науковій конференції «Proc. 9th International Expertcentrum Conf. On Failures of Concrete Structures. Edited by E.Javor», Братіслава, Словаччина, 2001; Міжнародному науковому симпозиумі «Proc. International Symp. "Non - Traditional Cements & Concrete"», Брно, Чехія, 2002; Науково-технічній конференції «Konferencja naukowo-techniczna: "Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa"», Ольштин-Ланськ, Польща, Вармінсько-Мазурській університет, 2002; Міжнародна конференція «Proc. of the International Conf. "Construction and Architecture". Durability design and fracture mechanics of concrete structures», Мінськ, Республіка Білорусь, 2003; Міжнародній науковій конференції «Всероссийская XXXI научно-техническая конференция "Актуальные проблемы современного строительства», Пенза, Россия, 2001; Міжнародній науковій конференції «Konferencja naukowo-techniczna: Budownictwo Polskie w rok po wstępieniu do Unii Europejskiej», Гданськ, Польща, 2005; Другому міжнародному симпозиумі «2nd International Symposium: Non – traditional Cement and Concrete», Брно, Чехія, 2005; II Міжнародній науково-практичній конференції «Техногенна безпека: теорія, практика, інновації», Львів: ЛДУ БЖД, 2011; Одинадцятій відкритій науковій конференції ІМФН «PSC-IMFS-11», Львів, 2013; міжнародній науково-технічній конференції «Системи 2013 – Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань», Львів, 2013.

Публікації. Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи висвітлено у 31 науковій статті, з яких 1 в закордонному виданні, що входить в наукометричну базу Scopus, 29 – у фахових виданнях України (з них чотири в Index Copernicus), а також 15 тезах доповідей на науково-технічних конференціях і 4 патентах України на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 300 найменувань, містить 394 сторінки друкованого тексту (з них 364 сторінки основного тексту), 75 таблиць, 251 рисунок, 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і завдання дослідження, показані наукова новизна і практичне значення роботи, та наведено відомості про апробацію та публікацію результатів досліджень.

У **першому розділі «Аналіз сучасного стану і напрямків розвитку методів визначення вогнестійкості будівельних конструкцій на основі режимів пожеж наближених до реальних»** проведено аналіз стану нормативної бази та наукових розробок щодо розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій в умовах пожежі, що наближені до реальних.

Аналіз літературних джерел показав, що статистичні дані за останні п'ять років свідчать, що не існує помітної тенденції до зниження кількості пожеж, крім цього, за цей період спостерігалася істотна кількість масштабних пожеж, що призвели до катастрофічних наслідків. Причому, за означений період такі пожежі виникали у багатьох країнах на різних континентах і соціальні втрати від них складали у кожному окремому випадку від декількох десятків до декількох сотень людей. Прямі матеріальні втрати від пожеж також набувають вражаючих цифр і, наприклад, щорічно в Україні у середньому складають більше 1.5 млрд. грн.

Аналіз робіт таких авторів як А.С. Белікова, В.П. Бушева, О.І. Голоднова, Б.Г. Демчини, В.О. Калєдина, В.В. Ковалишина, П.Г. Круковского, А.Ф. Милованова, С.В. Поздєєва, В.А. Пчелінцева, В.М. Ройтмана, В.Л. Страхова, М.М. Семерака, С.Л. Фоміна, В.С. Шмуклера, А.І. Яковлева, V. Bartelemi, D. Bernhart, L. Bisby, A. Buchanan, T. Harmathy, V. Kodur, G. Kruppa, T. Lie, T. Lennon, M. Schäfer, та інших дослідників, присвячених методам експериментального та розрахункового визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, показав перспективність для підвищення її точності використання температурних режимів пожежі, наближених до реальних.

Для окреслення області досліджень у цьому напрямку були проаналізовані роботи І.М. Абдурагімова, І.М. Абдурагімова, О.Є. Басманова, Б.Г. Демчини, П.Г. Круковского, А.Д. Кузика, В.В. Ковалишина, Ю.А. Кошмарова, І.С. Молчадського, С.В. Пузача, А.М. Рижова, В.Л. Страхова, N.P. Bryner, D. Carpenter, G. Cox, A.M. Christensen, D. Drysdale, K. Hill, G. Heskestad, S. Kumar, D. Madrzykowski, K.V. McGrattan, K. Pericleous та ін., які були присвячені розвиткові підходу, де розглядаються реальні температурні режими пожеж, що могли б бути використані для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій.

У результаті аналізу сучасного стану теоретичних та практичних досліджень пожеж показано що розрахункові режими реальної пожежі для досліджуваних елементів конструкцій мають суттєво нижчі температури за стандартний температурний режим, і різниця може складати від 400 °С до 800 °С, за рахунок врахування типу пожежного навантаження, геометрії його розташування, геометрії та положення прорізів, наявної вентиляції, наявної системи

автоматичного пожежогасіння і це приводить до невиправдано високих запасів вогнестійкості із профіцитом до 90 хв. і більше, зумовлюючи помилкові висновки щодо необхідності проведення додаткових заходів щодо вогнезахисту елементів будівельних конструкцій і зумовлених цим невиправданих трудових та матеріальних затратах на їх реалізацію, тоді як розрахунок з використанням реальних температурних режимів пожежі дозволяє їх уникнути, що підкреслює актуальність розробки таких методик.

При застосуванні даних методик певною проблемою є взаємне пов'язування на рівні початкових умов та основних положень для окремих задач, які входять до послідовності розрахункової оцінки відповідності того чи іншого елементу вимогам щодо його класу вогнестійкості, при цьому відсутня можливість комплексного врахування наявності автоматичних систем протипожежного захисту, вентиляції, типу пожежного навантаження і т.п. Ще одним проблемним питанням за умов застосування даного підходу є необхідність послідовного виконання даних етапів за відсутності можливості використання загальних математичних співвідношень для отримання кінцевого результату, що змогли б суттєво підвищити продуктивність розрахунків без позначення на перевагах такого підходу температурними режимами пожеж наближених до реальних, а саме більшій точності та достовірності із зниженням жорсткості вимог щодо вогнестійкості досліджуваних елементів конструкцій.

Усуненню вказаних недоліків підходу розрахункової оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій на основі температурних режимів пожеж, наближених до реальних, для вирішення актуальної науково-технічної проблеми, пов'язаної із отриманням достовірних і надійних даних щодо вогнестійкості будівельних конструкцій розрахунковими методами із суттєвим зниженням жорсткості вимог до неї і зменшенням витрат на заходи щодо її забезпечення було поставлено за мету у подальших дослідженнях дисертаційної роботи.

В другому розділі «Оцінка вогнестійкості елементів будівельних конструкцій на основі математичного моделювання реальної пожежі у приміщенні» описана методика моделювання пожежі із подальшим використанням результатів для оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій. Загальна послідовність розрахункових процедур запропонованого метода наведена нижче.

1. У приміщення певної будівлі розробляється сценарій пожежі за найбільш небезпечних умов при ініціації пожежі та її розвитку на ділянці із пожежним енергоємним навантаженням, горіння якого приводить до найбільшого рівня виділення тепла.

2. Відтворюється геометрична конфігурація приміщення із наявними прорізами, перешкодами та розташованого пожежного навантаження.

3. З врахуванням наявної вентиляції, систем автоматичного протипожежного захисту задаються граничні умови, які описують потоки повітря та потоки вогнегасної речовини.

4. Передбачається розташування трьох контрольних точок де визначаються температури на кожному кроці інтегрування поблизу відповідних елементів будівельних конструкцій, підданих розрахунковій оцінці вогнестійкості.

5. Простір приміщення дискретизується, будується сіткова модель та виконується розрахунок.

6. Шляхом усереднення визначається температурна залежність температури поблизу елемента конструкції від часу, яка і використовується як температурний режим пожежі.

7. Використовуючи стандартні розрахункові методи для оцінки вогнестійкості, виконується розрахунок відповідності елемента заданому класу вогнестійкості.

При розрахунку температурного режиму пожежі має бути застосований польовий метод, що заснований на розв'язання повної системи рівнянь Нав'є - Стокса. Дана система при розрахунках записується у вигляді:

$$\text{- рівняння зберігання маси: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}; \quad (1)$$

$$\text{- рівняння зберігання компоненту: } \frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho Y_\alpha = -\rho Y_\alpha \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}_\alpha'''; \quad (2)$$

$$\text{- рівняння зберігання моменту: } \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla \mathcal{H} = \frac{1}{\rho} ([\rho - \rho_m]) \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \tau_{ij}; \quad (3)$$

$$\text{- рівняння тиску: } \nabla^2 \mathcal{H} = -\frac{\partial (\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} - \frac{1}{\rho} ([\rho - \rho_m]) \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \tau_{ij} \right]; \quad (4)$$

$$\text{- рівняння стану газу по компонентах: } \bar{p}_m(z, t) = \rho T \mathcal{R} \sum_\alpha Y_\alpha / W_\alpha, \quad (5)$$

де ρ - густина речовини; t - час; \mathbf{u} - вектор швидкості $(u \ v \ w)^T$; y_α - маса фракції компоненту α ; d_α - коефіцієнт дифузії компоненту α ; \dot{m}_α''' - питома масова швидкість утворення компоненту α ; $\boldsymbol{\omega}$ - вектор завихрення $(\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$; ρ_m - густина речовини m -ої зони; \mathbf{g} - вектор гравітації, рівний $(0 \ 0 \ -g)^T$; \mathbf{f}_b - вектор внутрішніх сил; τ_{ij} - тензор в'язких напружень зсуву; h - фоновий тиск; r - універсальна газова стала; T - абсолютна температура (K); w_α - молекулярна маса речовини компоненту α .

Для визначення найбільш небезпечного випадку утворення та розвитку пожежі була побудована розрахункова схема приміщення торгівельної зали, де відбувається умовна пожежа, наведена на рис. 1, на якій показано розташування досліджуваних на вогнестійкість сталевих колон та пожежного навантаження.

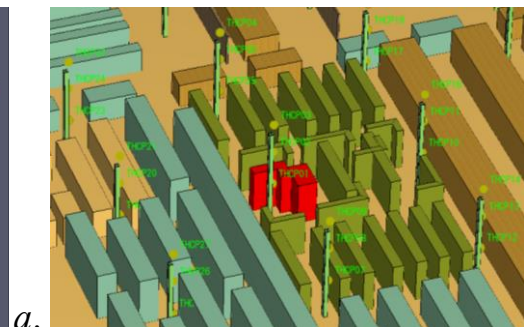
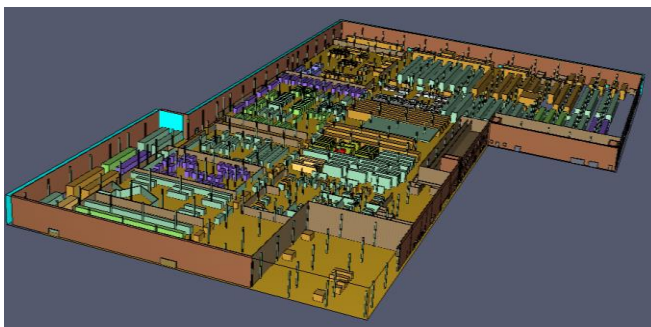


Рис. 1. Розрахункова схема приміщення торгівельної зали: *а* - внутрішня структура та пожежне навантаження у торгівельному залі; *б* - фрагмент торгівельної зали, де розташований осередок пожежі згідно із прийнятим сценарієм та сталеві колони, досліджувані на вогнестійкість

Система диференціальних рівнянь (1) – (5) доповнюється додатковими рівняннями та моделями та розв’язується чисельно. У табл. 1 наведені математичні моделі, що використовуються для моделювання.

У результаті розрахунку були отримані температурні режими поблизу колон у трьох точках (див. рис. 1 б), які були використані для визначення температурного режиму прогріву внутрішніх шарів досліджуваних сталевих колон. Для цього використана формула, яка визначає підвищення температури $\Delta\theta_{a,t}$ за проміжок часу Δt :

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{V c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \Delta t, \quad (6)$$

тут k_{sh} – поправочний коефіцієнт для врахування впливу тіньового ефекту; A_m/V – коефіцієнт перерізу для незахищених сталевих конструкцій; A_m – площа поверхні конструкції на одиницю довжини; V – об’єм конструкції на одиницю довжини; c_a – питома теплоємність сталі; \dot{h}_{net} – розрахункове значення результуючого питомого теплового потоку на одиницю площі; Δt – проміжок часу; ρ_a – густина сталі.

Таблиця 1

Основні математичні моделі та методи
для описання масотеплопереносу при пожежі

Особливості процесів тепломасообміну при пожежі	Математична модель або метод
Процес тепломасообміну	Система диференціальних рівнянь Нав’є-Стокса
Модель турбулентності	Модель великих вихорів (LES-модель)
Модель хімічної реакції	Одноступінчасте стехіометричне рівняння
Модель горіння	Модель Зельдовича
Модель променистого теплообміну	Метод кінцевих об’ємів (FVM)
Модель впливу автоматичних систем пожежогасіння	Метод частинок Лагранжа
Метод апроксимації диференціальних рівнянь	Метод кінцевих різниць за явною схемою «предиктор-коректор»
Програмне забезпечення для реалізації матмоделей	Fire Dynamic Simulator (FDS) (розробка національного інституту стандартів NIST USA)
Засіб візуалізації	Візуалізаційний модуль PyroSim

На рис. 2 наведені температурні режими нагріву дев’яти досліджуваних колон у місці із найбільшими температурами у приміщенні, які отримані за умов номінального впливу пожежі за стандартним температурним режимом та температурні режими нагріву тих же самих колон за умов впливу реальної пожежі, що отримані шляхом розрахунку за польовою моделлю.

Несуча здатність в умовах пожежі була визначена для колон за методиками EN 1993-1-2 Eurocode 3 з врахуванням геометричних характеристик відповідних колон та параметрів навантаження при поздовжньому згині за умови номінального теплового впливу пожежі на досліджувані сталеві колони за стандартним температурним режимом пожежі.

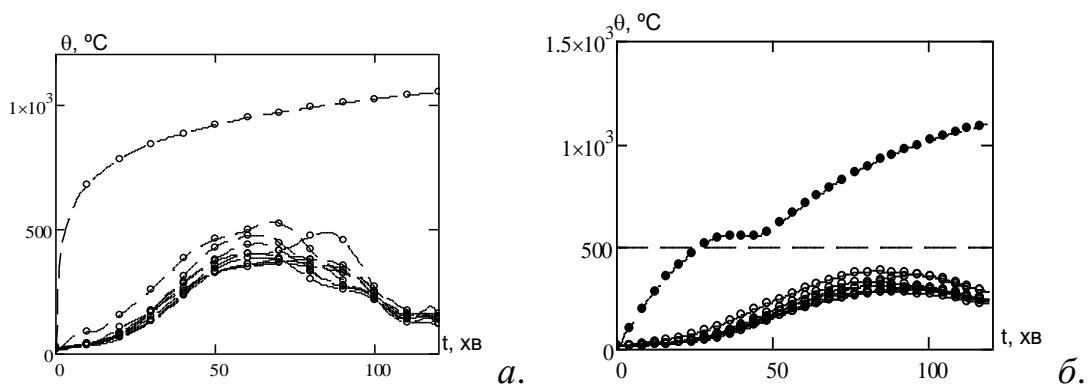


Рис. 2. Режим прогрівання сталевих колон протягом 120 хв. відповідного температурного режиму пожежі: *а* – розрахунковий температурний режим пожежі; *б* – температурний режим нагрівання колони

Отримана межа вогнестійкості для досліджуваних колон настає у проміжок часу від 38 до 46 хв.. Такі дані показують, що розрахунки, виконані за рекомендаціями EN 1993-1-2 Eurocode 3 за умов номінального теплового впливу пожежі за стандартним температурним режимом пожежі, визначають межі вогнестійкості колон, що не відповідають найнижчому нормованому класу вогнестійкості R 60, тоді як при врахуванні всіх реальних факторів колона може відповідати навіть самим жорстким вимогам класу R 150, оскільки за таких умов межа вогнестійкості взагалі не настає (див рис. 2 б). Таким чином, можна зробити висновок, що врахування основних особливостей приміщення, в якому вірогідне виникнення та розвиток пожежі, дозволяє обґрунтувати класи вогнестійкості елементів будівельних конструкцій без проектування додаткових заходів щодо їх вогнезахисту, що зумовлюють додаткові трудові та матеріальні затрати.

В третьому розділі «Обладнання та методики експериментальних досліджень» описані методики експериментальних досліджень теплового впливу пожежі у приміщеннях на температурні режими нагрівання будівельних конструкцій.

До основного експериментального обладнання відносяться моделі приміщень для двох серій експериментів. Перша серія експериментів проводиться на натурній моделі, що являє собою макет триповерхової будівлі із огороженнями та несучими конструкціями, виготовлених із залізобетону. Друга серія експериментів проводиться на зменшених моделях приміщень, що являють собою зменшені макети із огороженням у межах одного поверху із зменшеними розмірами із збереженням пропорційності. Огороджувальні конструкції моделей другої серії експериментів виготовлені з плит гіпсокартону вогнестійкого (ГКПВ) виробництва фірми Knauf (Німеччина). У якості пожежного навантаження використовується звичайні соснові дошки після просушування, що зібрані у штабель. Для вимірювання температури використовуються термопари хромель-алюмелеві ТХА 1590 та ТХА 1007, регулятори-вимірювачі ПКРТ-01-03 а також тепловізор Fluke-Ti25. Для вимірювань за допомогою тепловізора використані термоконтрастні керамічні елементи. Як джерело нагрівання для встановлення термодинамічних характеристик використовувалася паяльна станція LUKEY-702. У якості кріплення елементів використовувалася сітка із сталевого прутка. Визначення прогинів та деформацій огорожуючих конструкцій проводилось з

використанням механічних прогиномірів типу БПАО. Дослідження термодеструкції бетону огорожуючих конструкцій під час пожежі виконувалось з використанням методів акустичної емісії. Визначення міцності бетону огорожуючих та несучих конструкцій проводилось склерометром конструкції Хмельницького тресту «Спецбудмонтаж» перед випробуванням та після випробувань, крім того з конструкцій були висвердлені керни для випробування бетону до та після пожежі. Визначали вологість бетону огорожуючих конструкцій приладом «Greisinger».

Модель приміщення із пожежею триповерхової будівлі улаштувалася у існуючій нежитловій будівлі, що вийшла із експлуатації. На рис. 3 наведений загальний вигляд даної будівлі.



Рис. 3. Зовнішній вигляд триповерхової нежитлової будівлі, що вийшла з експлуатації, для улаштування моделі приміщення із пожежею

Для вивчення закономірностей впливу конфігурації приміщень та розташування прорізів у огороженні розглянуто декілька експериментальних ситуацій. На рис. 4 наведено кілька варіантів конфігурації та розташування прорізів у приміщеннях із зменшеними розмірами, згідно із програмою експериментів.

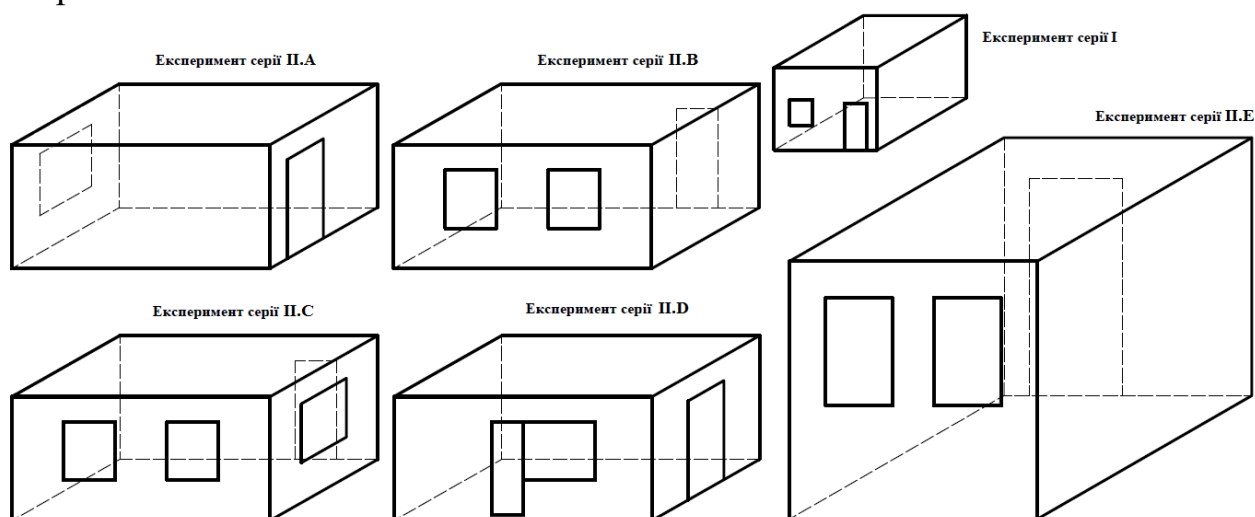


Рис. 4. Схеми моделей приміщень із пожежею із зменшеними розмірами

У табл. 2 наведено характеристики житлових кімнат, прийнятих для моделювання пожежі у приміщенні за допомогою параметричної кривої, представлена в нормах EN 1991-1-2 (2002).

Характеристики житлових кімнат для моделювання пожежі у приміщенні за допомогою параметричної кривої

Площа підлоги $A_f, \text{м}^2$	Висота кімнати $h_{eq}, \text{м}$	Загальна внутрішня площа $A_t, \text{м}^2$	Площа отворів $A_v, \text{м}^2$	Термічна інерція стін $b, \text{Дж/м}^2\text{с}^{1/2}\text{°C}$	Питоме пожежне навантаження $q_{f,d}, \text{МДж/м}^2$
12	2.6	60.4	2.175	600	400
15	2.8	74.8	3.06	900	500
20	3.0	94	3.22	1200	600
24	3.2	112	4.35	1500	700
35	3.4	151.6	11.2	1800	800

На рис. 5 наведена схема розташування термопар в об'ємі моделі приміщення по вертикальним площинам та схема розташування термопар в об'ємі моделі приміщення по горизонтальним площинам.

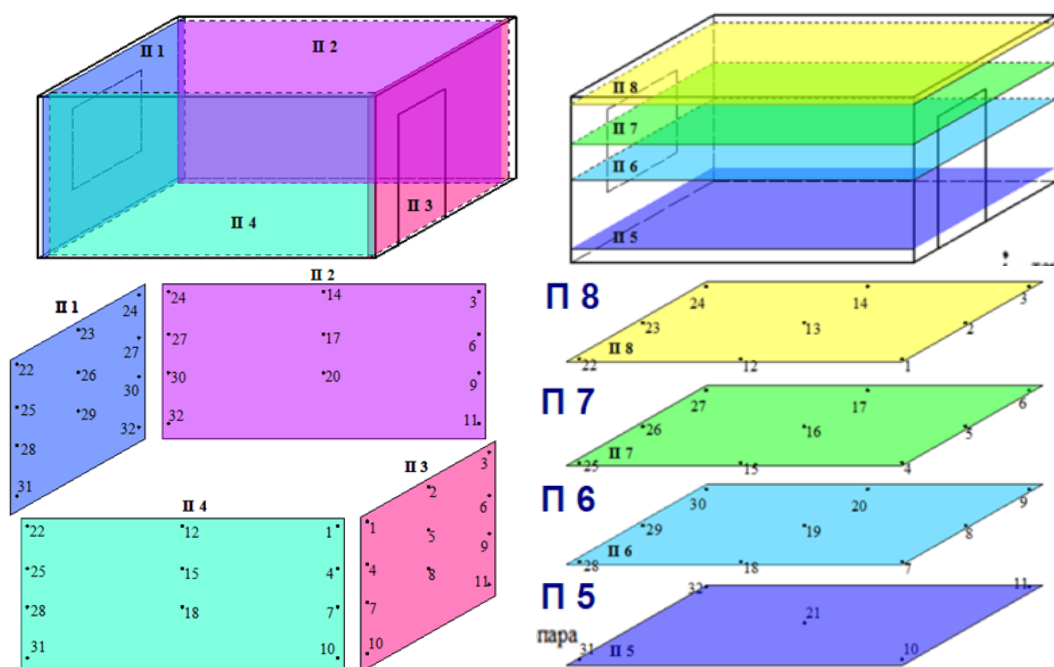


Рис. 5. Схема розміщення термопар у площинах П1...П8 у моделях приміщення

На рис. 6 показані етапи монтажу термовимірювальної арматури. Паралельно з вимірами температур в об'ємі моделей приміщень вимірювалася температура на поверхні огорожувальних конструкцій та температури вихідних гарячих газів з отворів моделей житлових приміщень за допомогою тепловізора Fluke Ti25 та матриці із термоконтрастними керамічними елементами.

Вивчення процесів теплообміну у моделях приміщень із пожежею проводилося відповідно до послідовності процедур, поданої нижче.

1. Відбувається підготовка та улаштування для проведення експерименту в умовах моделей приміщень.

2. Відбувається ініціація загоряння штабелів за допомогою факелу, який складається з дерев'яної жердини із ганчіркою, що просочена бензином.

3. Ініціюється вимірювання за допомогою контрольно-вимірювальною системою, що улаштована за описаними вище методиками.

4. Проведення експерименту триває до повного вигорання пожежного навантаження.

5. Показники термодатчиків фіксуються і вводяться у вигляді електронної таблиці.

6. Отримані температурні показники піддаються дослідженню адекватності шляхом визначення статистичних критеріїв Ст'юдента та Кохрена.

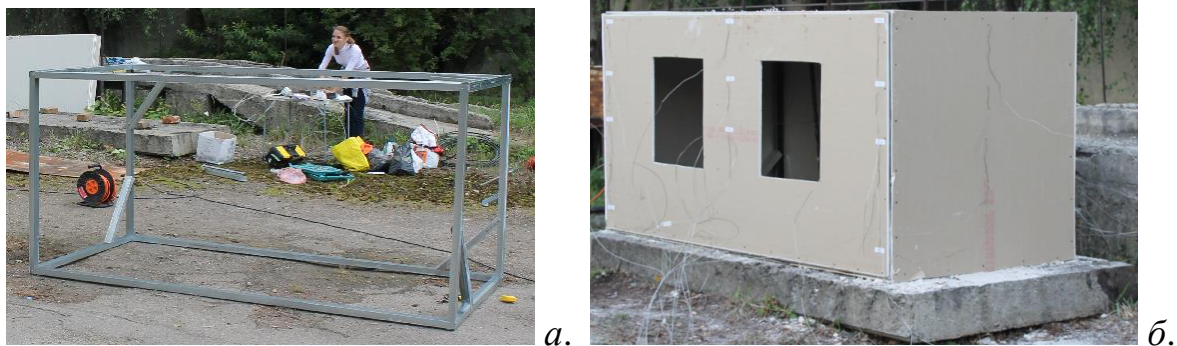


Рис. 6. Етапи монтажу термовимірювальної арматури: *а* – створення каркасу; *б* – створення огородження разом із термопарами

В четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень температурних режимів пожежі у моделях приміщень із пожежею» описані результати експериментальних досліджень. Згідно із методикою експериментальні дослідження температурних режимів пожеж з використанням натурної моделі приміщень у триповерховій будівлі, виведеної з експлуатації, проводилися за програмою двох дослідів – утворення та поширення пожежі на першому поверсі, а також утворення та поширення пожежі на другому поверсі. Пожежа ініціювалася на першому поверсі, поступово поширюючись через сходову клітину на другий поверх. Вважалося що перший дослід триває від початку пожежі до повного вигорання пожежного навантаження на першому поверсі, тоді як другий дослід розпочинався за умов виникнення пожежі природним чином та розвитком пожежі на другому поверсі до повного вигорання пожежного навантаження на ньому. Перший та другий дослід тривали до повного вигорання пожежного навантаження і тривалість першого дослідів складала орієнтовно 105 хв., а другого близько 40 хв.. На рис. 7 представлений вигляд пожежі у будівлі при проведенні послідовно першого та другого дослідів, на різних етапах її розвитку.



Рис. 7. Розвиток пожежі у натурних моделях приміщень при проведенні першого та другого дослідів

На рис. 8 наведено температурно-часові криві, що побудовані за показами термопар, що встановлені на першому поверху лівої бічної стіни натурної моделі приміщень де моделюється пожежа.

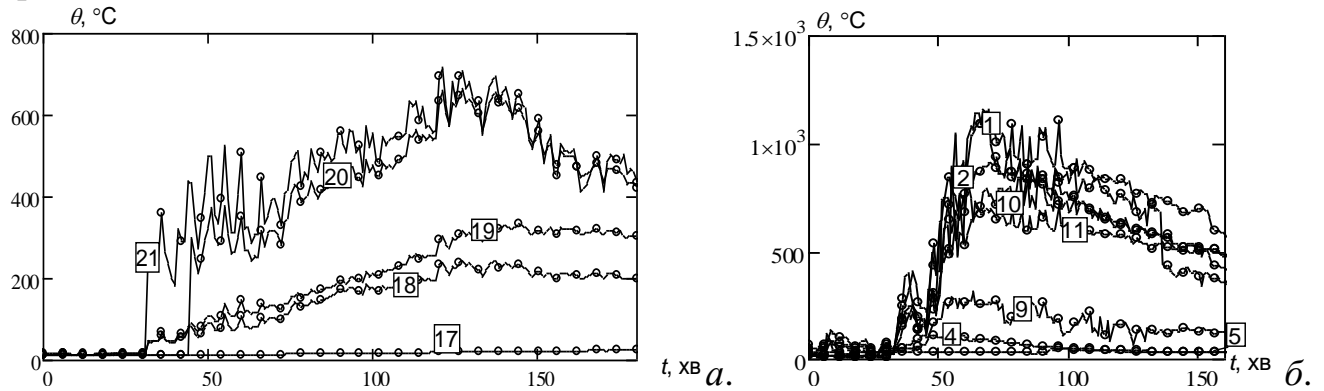


Рис. 8. Температурно-часові криві за показниками термопар (позначення кривих відповідають нумерації позначень термопар), що розташовані у лівій бічній стіні на першому поверсі (а) та у плиті перекриття між першим та другим поверхами (б) будівлі натурної моделі приміщень із пожежею

На рис. 10 наведений зовнішній вигляд одної із зменшених моделей приміщень із пожежею на різних етапах проведення випробувань.



Рис. 10. Зовнішній вигляд моделі серії П.А.2 на різних етапах випробувань

На рис. 11 у якості прикладу бази даних щодо вимірювання температури під час проведення експериментів наведені графіки показників термопар у площинах вимірювань за рис. 5 для серії випробувань П.А.2.

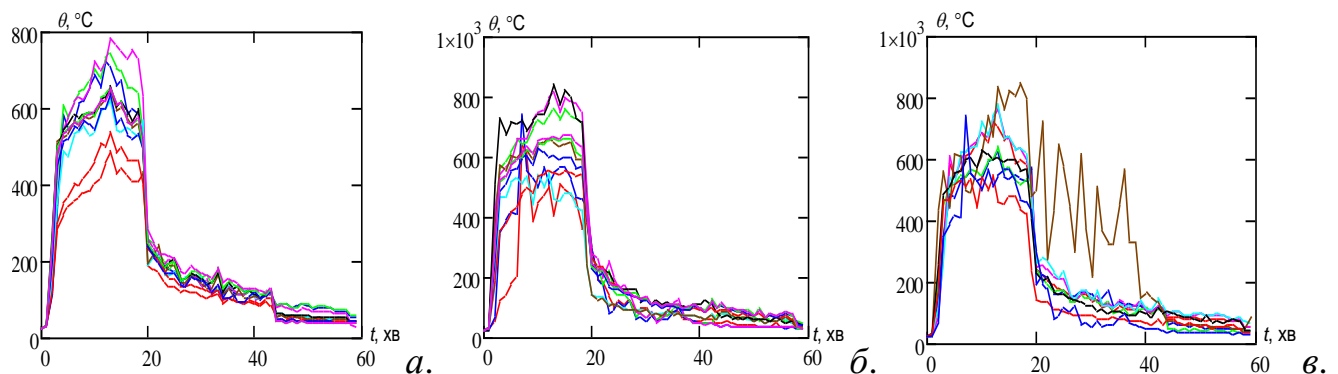


Рис. 11. Показники температури у площинах вимірювання (див. рис. 5): а – 1п; б – 3п; в – 7п

На рис. 12 а наведені дані щодо середніх температур по площинах вимірювань у вигляді температурних кривих, а на рис. 12 б наведена крива

залежності середньооб'ємної температури від часу, крива тренду та схематизована крива пожежі для визначення її основних параметрів.

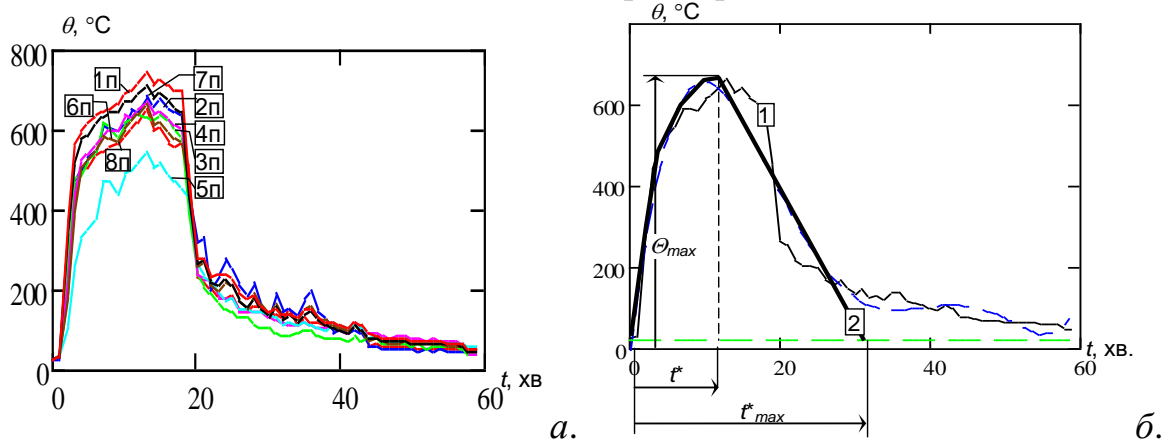


Рис. 12. Графіки залежності середньої температури по вимірювальним площинам (див. рис. 5) (а) та залежності середньооб'ємної температури від часу (б): 1п ... 8п – позначення вимірювальних площин; 1 – температурна крива залежності середньооб'ємної температури від часу; 2 – схематична крива пожежі

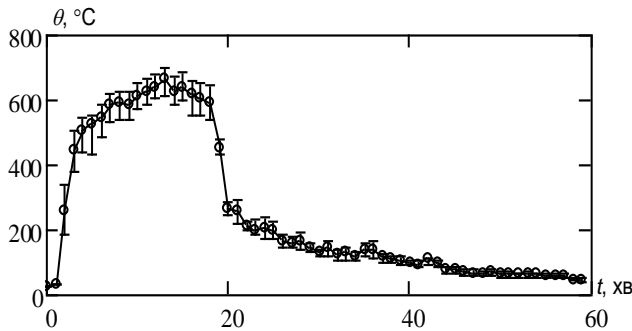


Рис. 13. Графік залежності середньооб'ємної температури по всім площинам вимірювання зменшеної моделі приміщення із пожежею II.A.2 із середніми дисперсіями показників температури по даним площинам

На рис. 13 наведені дані щодо середньої похибки, що спостерігається при даному розкиді значень температури по площинам вимірювання при використанні середньооб'ємної температури по простору зменшеної моделі приміщення із пожежею II.A.2.

Дослідження, результати яких наведені у попередньому пункті, показали, що параметри пожежі можуть бути пов'язані із параметрами приміщень

лінійною поліноміальною залежністю типу:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2, \quad (7)$$

де x_1 , x_2 – фактори, які відповідають початковим параметрам приміщень: коефіцієнту прорізів та величині питомого пожежного навантаження.

У табл. 3 вказані інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів.

Таблиця 3

Інтервали варіювання факторів у чисельному експерименті

Коефіцієнт прорізів O , $m^{1/2}$			Питоме пожежне навантаження, q_{fd} , $MДж/m^2$		
Найменше значення, O_{-1}	Середнє значення, O_0	Найбільше значення, O_1	Найменше значення, q_{-1}	Середнє значення, q_0	Найбільше значення, q_1
0.043	0.054	0.065	525	810	1095

Варіюючи параметри згідно із табл. 3, за результатами проведених експериментів були отримані параметри пожежі у відповідних зменшених фізичних моделях приміщень. Отримані дані наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Параметри пожеж у модельних приміщеннях в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування

Експериментальна ситуація	1	2	3	4
Максимальна середньооб'ємна температура пожежі, Θ_{max} , °C	585	176	665	271
Час досягнення максимальної температури пожежі, t , хв.	10	44	18	12
Тривалість пожежі, τ , хв.	100	165	60	93

Використовуючи дані табл. 4 мають бути визначені коефіцієнти регресійної залежності (7), які наведені у табл. 5.

Таблиця 5

Коефіцієнти регресії для параметрів пожеж

Модель	b_0 ,	b_1 ,	b_2 ,	b_3 ,
Максимальна середньооб'ємна температура пожежі	424.25	-43.75	200.75	3.75
Час досягнення максимальної температури пожежі	21	-7	6	-10
Тривалість пожежі, τ , хв.	104.5	28	-24.5	-8

В п'ятому розділі «Математичне моделювання пожеж у приміщеннях» описані результати математичного моделювання пожеж у приміщеннях. Модель приміщення із пожежею у триповерховій будівлі має відтворювати реальний об'єкт, загальний вигляд якого наведений на рис. 3. Для розрахунку небезпечних факторів пожежі використана інтегрована система Pyrosim. Pyrosim - це користувацький інтерфейс для програми Fire Dynamics Simulator (FDS). Польова модель FDS може передбачати поширення диму, температури та інших небезпечних факторів під час пожежі.

На рис. 14 наведена 3-D модель із розташуванням точок контролю температурних показників в приміщеннях триповерхової будівлі.

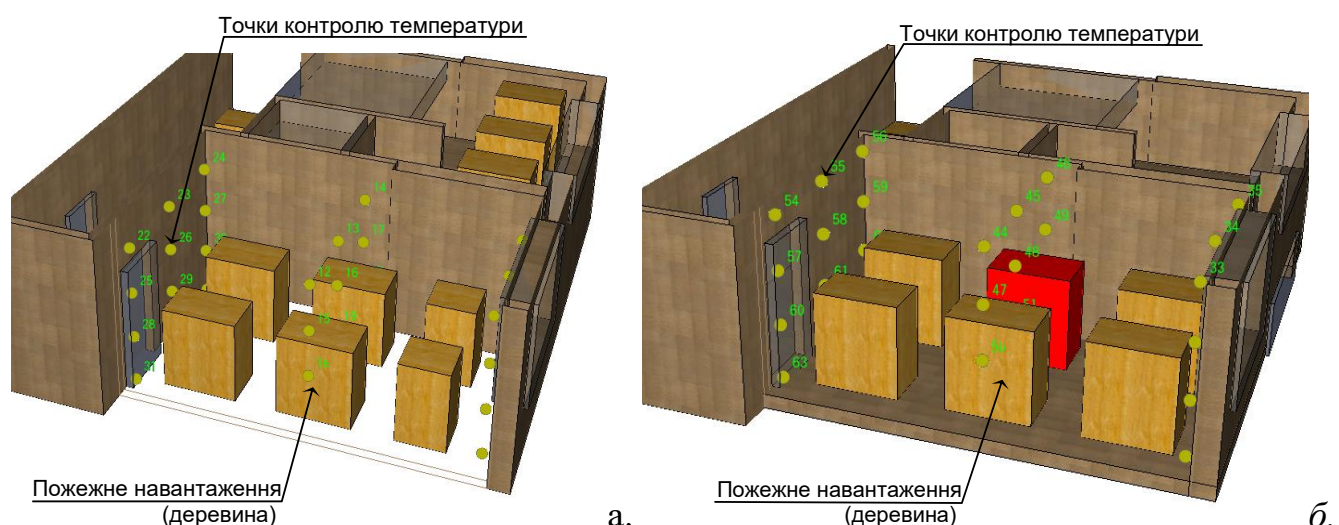


Рис. 14. Розташування точки знімання температурних показників які розташовані на першому поверсі (а) та другому поверсі (б) експериментальної будівлі

Відповідно до контрольних точок, які розташовані на відстані 0,1 м від внутрішньої поверхні огорожуючих конструкцій, були отримані графіки температури у залежності від часу. Результати наведені на рис. 15.

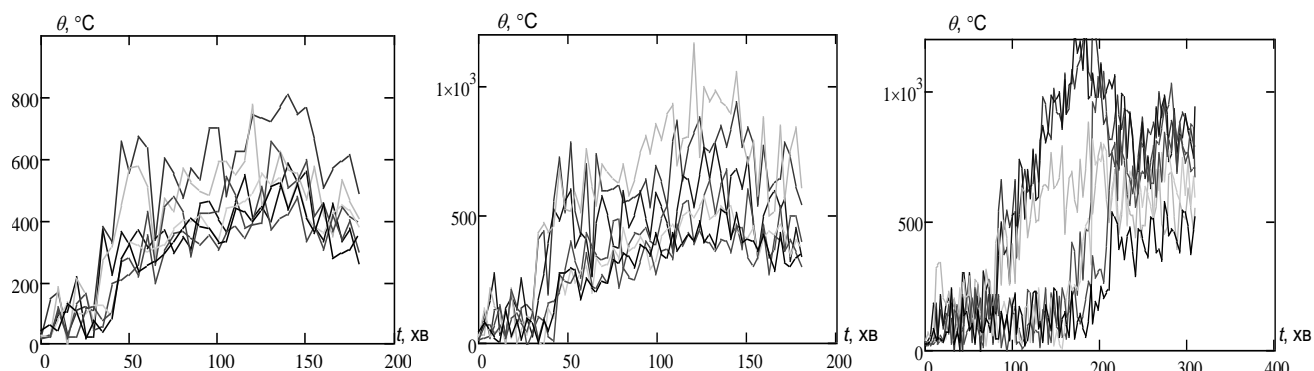


Рис. 15. Показники температури у площинах вимірювання (див. рис. 14)

На рис. 16 наведені геометричні схеми розрахункової області, розташування прорізів для деяких зменшених моделей приміщень.

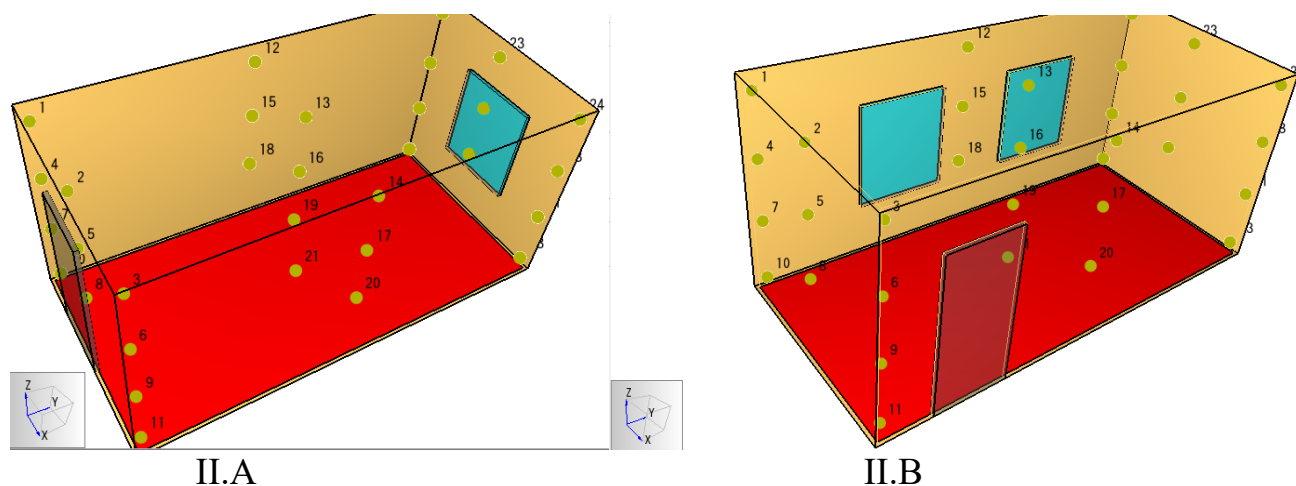


Рис. 16. Геометричні схеми розрахункової області деяких експериментальних приміщень

На рис. 17 у якості прикладу бази даних щодо визначення температури у результаті математичного моделювання наведені графіки показників термодинамічних параметрів у площинах вимірювань за рис. 16 для серії випробувань П.А.2.

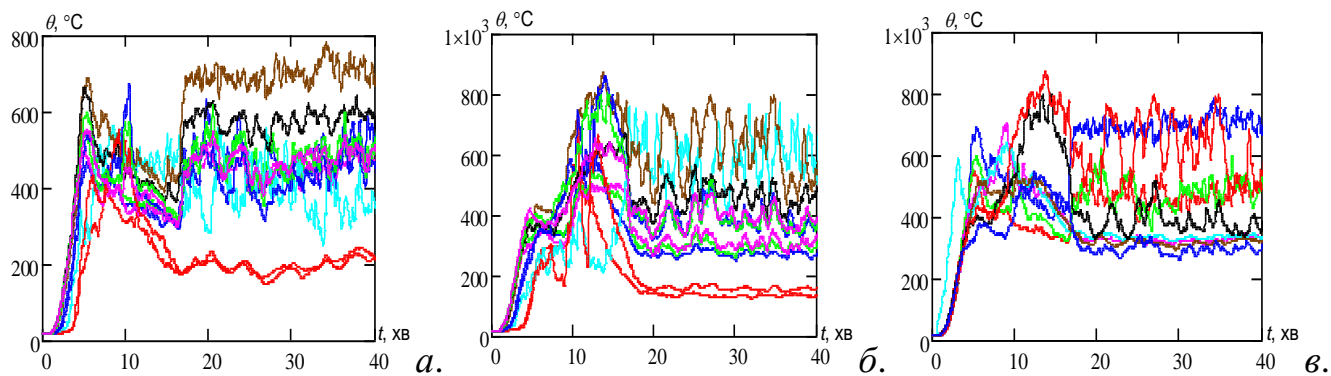


Рис. 17. Показники температури у площинах вимірювання (див. рис. 5): а – 1п; б – 3п; в – 7п

На рис. 18 *а* наведені дані щодо середніх температур по площинах вимірювань у вигляді температурних кривих, а на рис. 18 *б* графік середньооб'ємної температури з відхиленнями

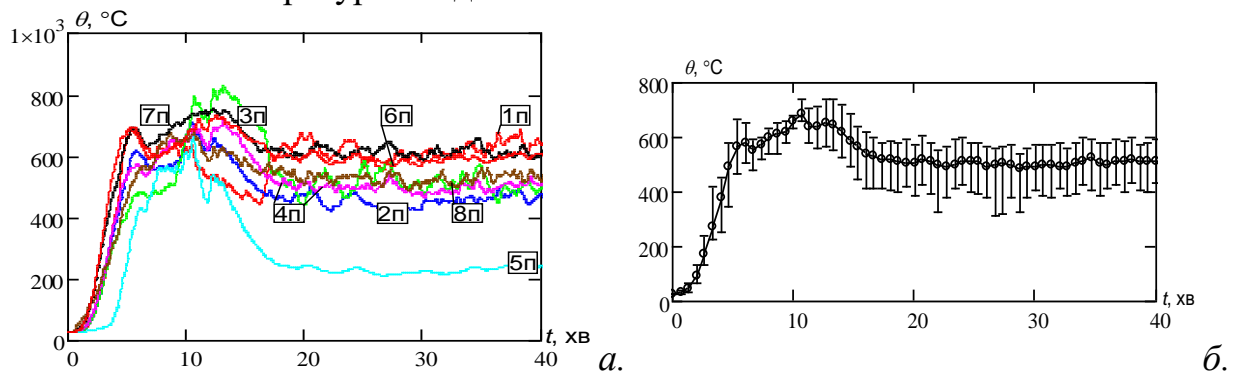


Рис. 18. Графіки залежності середньої температури по вимірювальним площинам (див. рис. 5) (*а*) та залежності середньооб'ємної температури від часу із середніми відхиленнями (*б*)

Для визначення точності та достовірності такого аналізу, потрібно вивчити вплив похибки розрахунку на результати визначення даних параметрів. У табл. 6 наведені значення абсолютного та відносного відхилення середньооб'ємної температури, часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури та тривалості пожежі при їх визначення за всіма зменшеними моделями приміщень із пожежею.

Таблиця 6

Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для відповідних термопар, що порівнювалися

№ п/п	Параметр	Абсолютні відхилення	Відносні відхилення, %
1.	Максимальна середньооб'ємна температура, °С	64.9	12.4
2.	Час досягнення максимальної середньооб'ємної температури, хв.	4	5.2
3.	Тривалість пожежі	12	16.3

Результати, наведені у табл. 6 показують, що за допомогою математичного моделювання пожеж засобами комп'ютерної газогідродинаміки дозволяють визначити параметри режиму пожежі достатньо точно, оскільки відносна похибка не перевищує у середньому 15%.

В шостому розділі «Розробка математичного апарату для методу розрахунку температурного режиму пожежі» описані математичні моделі залежностей максимальної середньооб'ємної температури нагріву під час пожежі, часу її досягнення та тривалості пожежі від параметрів приміщення із пожежею: коефіцієнту прорізів O та питомого пожежного навантаження $q_{t,d}$. Данні математичні моделі необхідні для побудування кривої параметричного температурного режиму пожежі. Математичний апарат для визначення температурного режиму пожежі у діапазоні коефіцієнту прорізів від $0.001 \text{ м}^{1/2}$ до $0.1 \text{ м}^{1/2}$, питомої теплоутворювальної здатності від 200 МДж/м^2 до 1200 МДж/м^2 у приміщення x не більше 150 м^2 базується на використанні формул (8) – (16) у

комбінаціями із формулами для визначення основних параметрів пожежі, що мають такий загальний вигляд у випадку із наявною системою автоматичного пожежогасіння:

- для математичного описання температурного режиму пожежі на зростаючій гілці пропонується використовувати формулу

$$\Theta_p = 20 + \frac{\Theta_{e_{max}} - 20}{\Theta_{max}} 1325 \left(1 - 0.324 \exp(-0.333 \cdot 10^{-3} t) - 0.204 \exp(-0.028 t) - 0.472 \exp(-0.317 t) \right), \quad (8)$$

- де початкове значення середньооб'ємної максимальної температури, визначається за формулою

$$\Theta_{max} = 20 + 1325 \left(1 - 0.324 \exp(-0.333 \cdot 10^{-3} t_m) - 0.204 \exp(-0.028 t_m) - 0.472 \exp(-0.317 t_m) \right); \quad (9)$$

- для описання спадної гілки пожежі пропонується використовувати формулу, яка виражає лінійний закон зменшення температури

$$\Theta_c = \Theta_{e_{max}} - \frac{\Theta_{e_{max}} - 20}{\tau_{max} - t_m} (t - t_m), \quad (10)$$

тут параметри $\Theta_{e_{max}}$, t_m та τ_{max} – відповідно максимальна середньооб'ємна температура, час досягнення максимальної середньооб'ємної температури та тривалість пожежі. Дані величини визначаються за допомогою регресійних залежностей, що отримані у результаті проведення повного факторного експерименту та у результаті математичного моделювання впливу похибки розрахунків, масштабу приміщень при їх представленні зменшеними моделями, пожежної автоматики, штучної вентиляції.

За умови наявності автоматичних водяних систем пожежогасіння параметри виразів (8) – (10) визначаються за виразами:

- для максимальної середньооб'ємної температури:

$$\Theta_{e_{max}} = k_{m\Theta} k_{\sigma\Theta} k_{a\Theta} (384.587 + 17281.1 \cdot O - 0.218 \cdot q_{t,d} + 1.196 \cdot O \cdot q_{t,d}); \quad (11)$$

- для часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури:

$$t_m = k_{mt} k_{\sigma t} k_{at} (101.211 + 1947.368 \cdot O - 0.1933 \cdot q_{t,d} + 3.1898 \cdot O \cdot q_{t,d}); \quad (12)$$

- для тривалості пожежі:

$$\tau_m = k_{m\tau} k_{\sigma\tau} k_{a\tau} (33.576 + 160.287 \cdot O - 2.552 \cdot q_{t,d} + 0.236 \cdot O \cdot q_{t,d}). \quad (13)$$

У випадку наявності системи вентиляції дані формули набувають такого вигляду:

- для максимальної середньооб'ємної температури:

$$\Theta_{\text{max}} = k_{m\Theta} k_{\delta\Theta} k_{v\Theta} (384.587 + 17281.1 \cdot O - 0.218 \cdot q_{t,d} + 1.196 \cdot O \cdot q_{t,d}); \quad (14)$$

- для часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури:

$$t_m = k_{mt} k_{\delta t} k_{vt} (101.211 + 1947.368 \cdot O - 0.1933 \cdot q_{t,d} + 3.1898 \cdot O \cdot q_{t,d}); \quad (15)$$

- для тривалості пожежі:

$$\tau_m = k_{m\tau} k_{\delta\tau} k_{v\tau} (33.576 + 160.287 \cdot O - 2.552 \cdot q_{t,d} + 0.236 \cdot O \cdot q_{t,d}); \quad (16)$$

У випадку наявності і автоматичної системи пожежогасіння і системи вентиляції дані формули набувають такого вигляду:

- для максимальної середньооб'ємної температури:

$$\Theta_{\text{max}} = k_{m\Theta} k_{\delta\Theta} k_{av\Theta} (384.587 + 17281.1 \cdot O - 0.218 \cdot q_{t,d} + 1.196 \cdot O \cdot q_{t,d}); \quad (17)$$

- для часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури:

$$t_m = k_{mt} k_{\delta t} k_{avt} (101.211 + 1947.368 \cdot O - 0.1933 \cdot q_{t,d} + 3.1898 \cdot O \cdot q_{t,d}); \quad (18)$$

- для тривалості пожежі:

$$\tau_m = k_{m\tau} k_{\delta\tau} k_{av\tau} (33.576 + 160.287 \cdot O - 2.552 \cdot q_{t,d} + 0.236 \cdot O \cdot q_{t,d}); \quad (19)$$

Коефіцієнти, що враховують наявність систем автоматичного пожежогасіння та систем вентиляції, зведені до табл. 7.

Таблиця 7

Величини поправочних коефіцієнтів що встановлюють зв'язок між параметрами пожежі у приміщеннях із наявною системою пожежогасіння та системою вентиляції

Параметр	Величина для приміщення із АСП		Величина для приміщення із СВ		Величина для приміщення із АСП та СВ	
	Позн.	Вел-на	Позн.	Вел-на	Позн.	Вел-на
Поправочний коефіцієнт для максимальної середньооб'ємна температура	$k_{a\Theta}$	0.842	$k_{v\Theta}$	1.111	$k_{av\Theta}$	0.863
Поправочний коефіцієнт для часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури	k_{at}	1.185	k_{vt}	0.56	k_{avt}	0.628
Поправочний коефіцієнт для тривалості пожежі	$k_{a\tau}$	0.882	$k_{v\tau}$	0.891	$k_{av\tau}$	1.101
Коефіцієнт безпеки для максимальної середньооб'ємної температури, $k_{\delta\Theta}$	1.12					
Коефіцієнт безпеки для часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури, $k_{\delta t}$	1.06					

Коефіцієнт безпеки для тривалості пожежі, $k_{\delta\tau}$	1.15
Масштабний коефіцієнт для максимальної середньооб'ємної температури, $k_{m\Theta}$	0.896
Масштабний коефіцієнт для часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури, k_{mt}	1.344
Масштабний коефіцієнт для тривалості пожежі, $k_{m\tau}$	1.184

З метою побудування температурних режимів пожеж за розробленим математичним апаратом були виконані розрахунки. На рис. 19 наведені приклади визначення температурного режиму пожежі згідно із певними параметрами приміщення за формулами (8) – (19) у вигляді відповідних графіків.

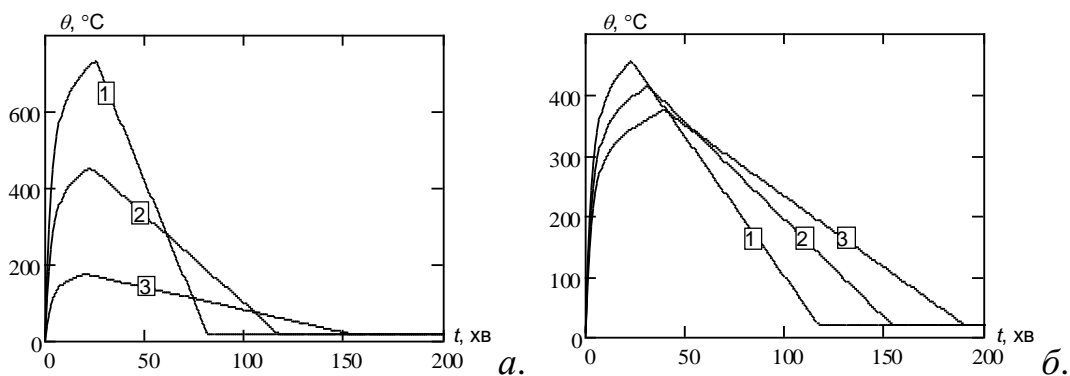


Рис. 19. Графіки температурних режимів пожежі при різних значеннях щільності пожежного навантаження за постійного значення коефіцієнту прорізів $O = 0.45 \text{ м}^{0.5}$ (а) (1 – $q_{t,d} = 1200 \text{ МДж/м}^2$, 2 – $q_{t,d} = 800 \text{ МДж/м}^2$, 3 – $q_{t,d} = 400 \text{ МДж/м}^2$) та при різних значеннях коефіцієнту прорізів за постійного значення щільності пожежного навантаження $q_{t,d} = 800 \text{ МДж/м}^2$ (б) (1 – $O = 0.045 \text{ м}^{1/2}$, 2 – $O = 0.055 \text{ м}^{1/2}$, 3 – $O = 0.065 \text{ м}^{1/2}$)

Для відтворення більш детальної картини були побудовані поверхні розподілення температури у залежності від значень коефіцієнту прорізів та щільності пожежного навантаження для різних моментів часу розвитку пожежі. На рис. 20 наведені побудовані розподілення.

З рис. 20 видно, що зменшення коефіцієнтів прорізу приводить до збільшення максимальної температури пожежі, зменшення часу її досягнення та тривалості пожежі, оскільки такі умови очевидно приводять до зменшення тепловідведення при збільшенні швидкості вигорання за рахунок цього. Так само можна пояснити і залежності для щільності пожежного навантаження.

На рис. 21 наведені розподіли температури, утворені різними температурними режимами у залежності від значень коефіцієнту прорізів та щільності пожежного навантаження.

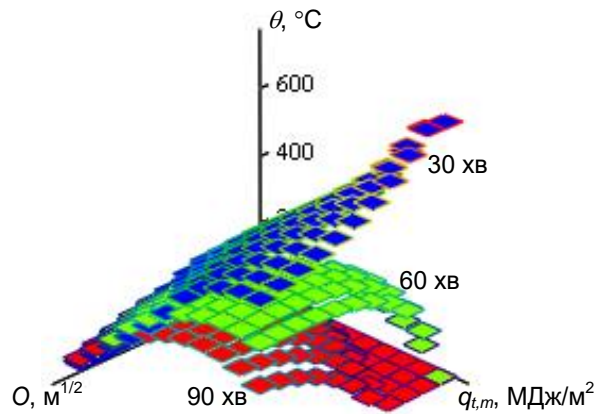


Рис. 20. Поверхні розподілення температури у залежності від значень коефіцієнту прорізів та щільності пожежного навантаження для різних моментів часу розвитку пожежі

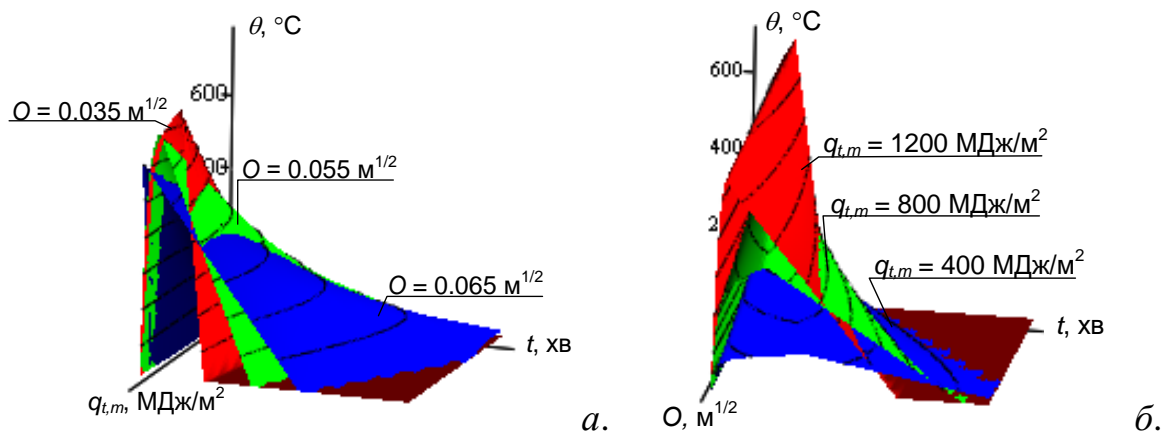


Рис. 21. Розподіли температури, утворені різними температурними режимами у залежності від значень коефіцієнту прорізів (а) та щільності пожежного навантаження (б)

На рис. 21 видно, що із зменшенням щільності пожежного навантаження зменшується максимальна температура, а час її досягнення та тривалість пожежі збільшується. При збільшенні коефіцієнту прорізів зменшується максимальна температура пожежі, а час її досягнення збільшується.

В сьомому розділі «Розрахункова оцінка вогнестійкості елементів будівельних конструкцій під впливом температурного режиму пожежі, наближеного до реального» описано методи для розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій із застосуванням розроблених математичних моделей для побудування параметричних режимів пожежі.

Використовуючи формулу (6) та математичні моделі за формулами (8) – (16), були визначені температурні режими нагрівання для елементів сталевих конструкцій для різних значень коефіцієнту перерізу та критичної температури нагрівання. На рис. 22 наведені температурні режими нагрівання елемента сталевій конструкції із коефіцієнтом перерізу $A_m/V = 70 \text{ м}^{-1}$ за умов різних параметрів приміщень із пожежею.

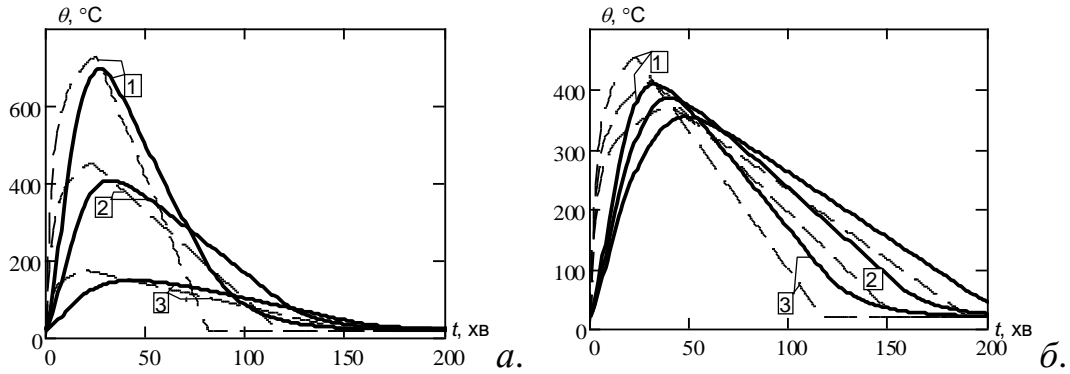


Рис. 22. Графіки температурних режимів нагріву елемента сталевій конструкції (суцільна лінія) для температурних режимів пожежі (пунктирна лінія) у приміщеннях при різних значеннях щільності пожежного навантаження за постійного значення коефіцієнту прорізів $O = 0.45 \text{ м}^{0.5}$ (а) (1 – $q_{t,d} = 1200 \text{ МДж/м}^2$, 2 – $q_{t,d} = 800 \text{ МДж/м}^2$, 3 – $q_{t,d} = 400 \text{ МДж/м}^2$) та при різних значеннях коефіцієнту прорізів за постійного значення щільності пожежного навантаження $q_{t,d} = 800 \text{ МДж/м}^2$ (б) (1 – $O = 0.045 \text{ м}^{1/2}$, 2 – $O = 0.055 \text{ м}^{1/2}$, 3 – $O = 0.065 \text{ м}^{1/2}$)

Також був визначений час настання даного граничного стану, що є фактичною межею вогнестійкості даної конструкції для приміщень із пожежею із різними параметрами за формулами (6), (8) – (16). На рис. 23 наведений час досягнення граничного стану для різних критичних температур для сталевому елементу із коефіцієнтом перерізу $A_m/V = 70 \text{ м}^{-1}$.

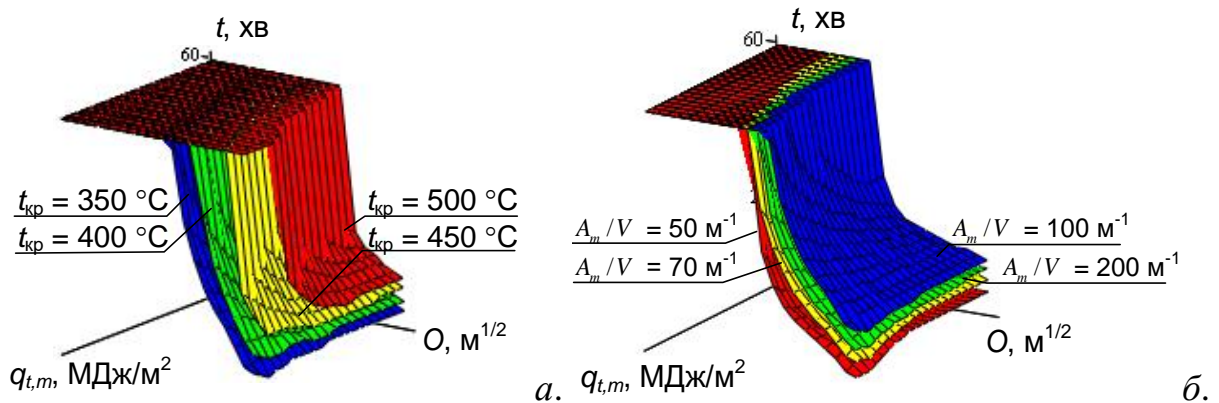


Рис. 23. Розподіл часу досягнення граничного стану втрати несучої здатності у залежності від коефіцієнту прорізів та щільності пожежного навантаження для різних критичних температур у сталевому елементі із коефіцієнтом перерізу $A_m/V = 70 \text{ м}^{-1}$ (а) та критичної температури 350 °C

Математичний апарат, що був використаний для отримання вищенаведених результатів можна використати для побудування номограм для визначення фактичної межі вогнестійкості для елемента із певним значенням критичної температури та коефіцієнту перерізу даного елемента сталевій конструкції. На рис. 24 у якості прикладу наведені подібні номограми.

Використовуючи номограми, подібні до номограм, наведених на рис. 24, можна визначити фактичну межу вогнестійкості елемента, що має певний

коефіцієнт перерізу A_m/V та розраховані на критичну температуру із стандартного ряду, як показано на рис. 24 а.

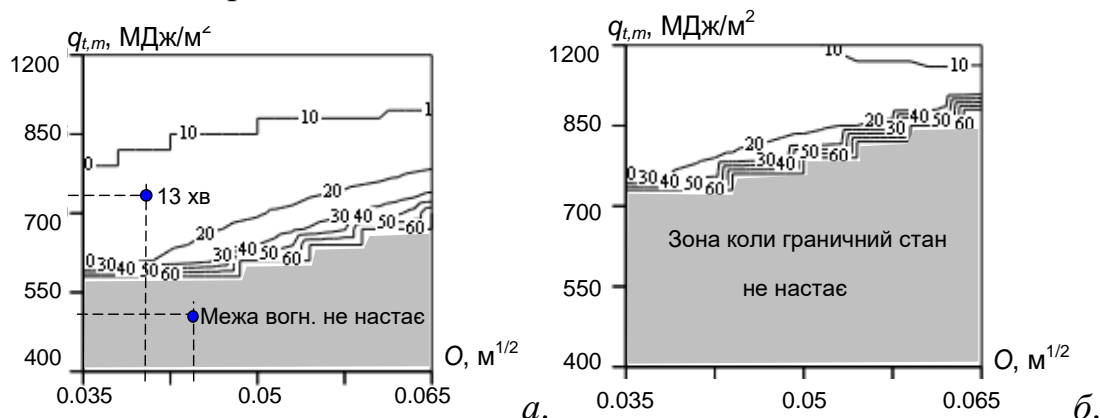


Рис. 24. Номограма для визначення параметрів коефіцієнтів прорізів та щільності пожежного навантаження приміщення із пожежею для проектування вогнестійких сталевих будівельних конструкцій при $A_m/V = 150 \text{ м}^{-1}$: а - $\theta_{кр} = 350 \text{ °C}$; б - $\theta_{кр} = 500 \text{ °C}$

Для того щоб визначити фактичну межу вогнестійкості за номографічним методом з використанням запропонованих номограм можна використати послідовність процедур, що подана у вигляді схеми, наведеної на рис. 25.

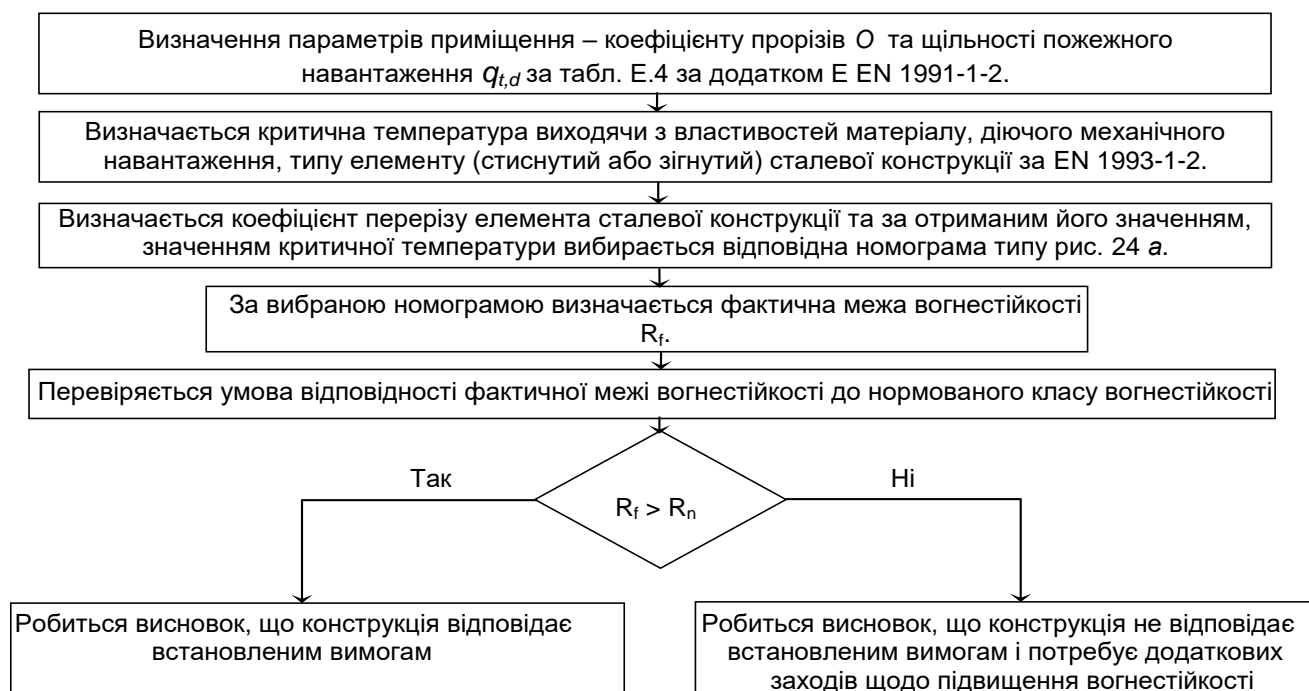


Рис. 25. Схема розрахункової методики для оцінки вогнестійкості елементів сталевих конструкцій номографічним методом

Для здійснення розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій має бути визначена температура прогріву елементів даних конструкцій у будь-який момент часу пожежі. Для визначення температури нагріву незахищених

елементів дерев'яних конструкцій застосовується основний підхід, що заснований на розв'язку нестационарного рівняння теплопровідності, що має вигляд:

$$c_p(\theta)\rho_w(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_w(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_w(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial y}\right), \quad (20)$$

де $\rho_w(\theta)$ – густина деревини, залежна від температури, кг/м³; $c_p(\theta)$ – питома теплоємність деревини, залежна від температури, Дж/(кг·°C); $\lambda_w(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності деревини, залежний від температури, Вт/(м·°C); t – час, с.

Рівняння нестационарної теплопровідності (20) має бути розв'язаним із врахуванням теплофізичних характеристик деревини даних елементів конструкцій, граничних умов теплового впливу пожежі із режимом, розрахованим з використанням формул (8) – (19), відповідної геометричної конфігурації перерізу, що по суті є розрахунковою областю.

Теплова задача у такій постановці передбачає застосування граничних умов III роду:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial r} = \alpha(\theta_{fi} - \theta_w), \quad (21)$$

де α – коефіцієнт теплообміну; θ_{fi} – температура поблизу поверхні елемента дерев'яної конструкції; θ_w – температура поверхні елемента дерев'яної конструкції; r – поточна просторова координата.

Коефіцієнт теплообміну визначається за умови врахування конвекції та теплообміну тепловим випромінюванням і має визначатися за таким виразом:

$$\alpha = \alpha_B + \alpha_K \quad (22)$$

де: α_B – коефіцієнт теплообміну випромінюванням; α_K – коефіцієнт конвективного теплообміну.

Значення складових коефіцієнту теплообміну обчислюється за рекомендаціями стандартів EN 1991-1-2 EN 1995-1-2 при використанні формул:

$$\alpha_K = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}); \alpha_B = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta_w^4 - \theta_p^4}{\theta_w - \theta_p}, \quad (23)$$

де $\varepsilon = 0,8$ – ступінь чорноти поверхні елемента дерев'яної конструкції; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}^4)$ – стала Стефана-Больцмана; $\alpha = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ загальний коефіцієнт теплообміну на не обігрівній стороні, який враховує конвекцію і випромінювання одночасно.

Розглядається переріз суцільної дерев'яної балки із трьохстороннім обігрівом. Схеми даного перерізу наведені на рис. 26.

Початкові дані та дані щодо постановки крайової задачі просторового кроку дискретизації розрахункової області перерізу для застосування методу кінцевих різниць наведені вище. Використовуючи описаний вище підхід були складені

кінцево-різницеві схеми для балок із різною геометричною конфігурацією перерізів.

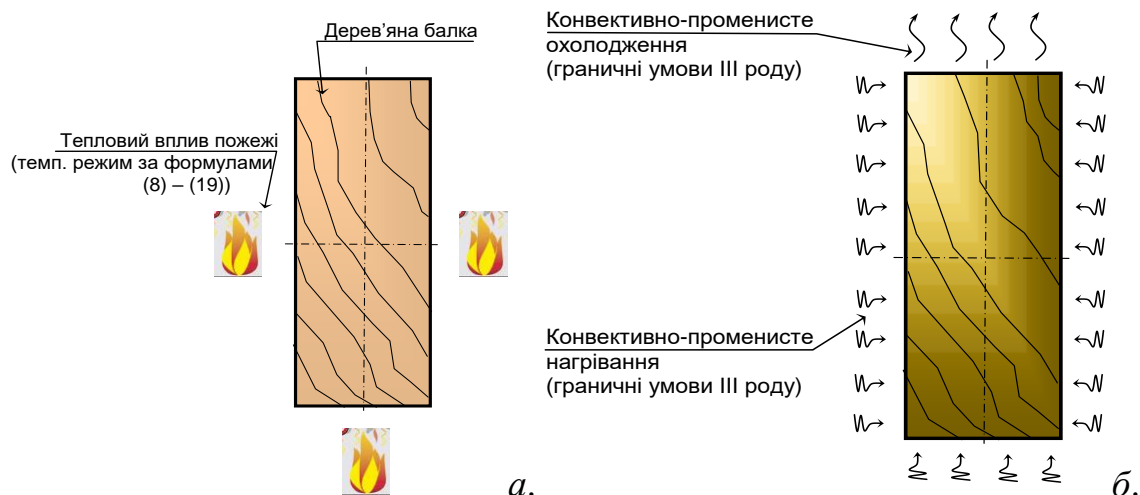


Рис. 26. Конструктивна схема перерізу дерев'яної балки (а) та схема для описання граничних умов для постановки крайової задачі теплопровідності (б)

Після проведення розрахунків були отримані температурні розподіли. Приклад температурних розподілів для балки перерізом 200×400 для температурного режиму пожежі, що визначений для приміщення із коефіцієнтом прорізів $O = 0.0045 \text{ м}^{-1}$ та щільністю пожежного навантаження $q_{t,m} = 1200 \text{ МДж/м}^2$ наведений на рис. 27.

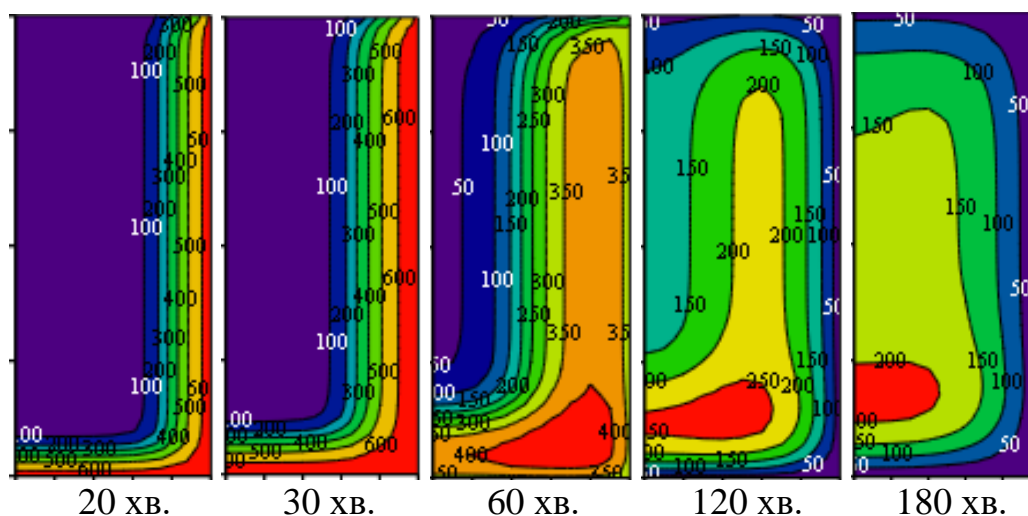


Рис. 27. Температурні розподіли ($^{\circ}\text{C}$) для балки перерізом 200×400 під впливом пожежі із режимом, що визначений для приміщення із коефіцієнтом прорізів $O = 0.0045 \text{ м}^{-1}$ та щільністю пожежного навантаження $q_{t,m} = 1200 \text{ МДж/м}^2$ у різні моменти часу

Ознака початку обуглювання визначається за умовою досягнення у внутрішньому шарі температури $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Використовуючи результати розрахунку були визначені значення швидкості обуглювання для описання залежності якої я від часу пожежі застосовується вираз:

$$v(t) = v_{\max}(1 - t/t_{\max}). \quad (24)$$

Максимальна швидкість обвуглювання та максимальний час процесу обвуглювання визначаються за виразами, що отримані за визначенням регресійними залежностями, отриманим за допомогою проведення повного факторного чисельного експерименту:

- для максимальної швидкості (мм/хв.):

$$v_{\max} = 0.648 + 30.742 \cdot O - 0.00178 \cdot q_{t,d} + 0.0239 \cdot O \cdot q_{t,d}; \quad (25)$$

- для максимального часу процесу обвуглювання (хв):

$$t_{v\max} = 26.915 + 1058.6 \cdot O - 0.0446 \cdot q_{t,d} + 0.718 \cdot O \cdot q_{t,d}. \quad (26)$$

При визначенні несучої здатності дерев'яних балок зручно використовувати спрощений розрахунковий метод, який рекомендований у EN 1995-1-2: 2012 Eurocode 5. За даним методом несуча здатність перерізу дерев'яної балки має визначатися з використанням виразу:

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} f_{c,0,k}, \quad (27)$$

де $f_{c,0,k} = 65$ МПа – міцність деревини на згин за нормальних умов; $k_{mod,fi} = \frac{W_{ef}}{W_r}$ –

коефіцієнт зменшення міцності; тут W_{ef} – ефективний осьовий момент опору перерізу балки, що визначається з врахуванням зони обвуглювання; W_r – приведений осьовий момент опору перерізу балки за нормальних умов. Коефіцієнт зменшення міцності перерізу балки з врахуванням обвуглювання визначається за формулою:

$$k_{mod,fi} = \frac{(b - x_c(t))(h - x_c(t))^2}{bh^2}, \quad x_c(t) = v_{\max}(t - 0.5 \cdot t^2 / t_{v\max}). \quad (28)$$

У даній формулі в якості параметру часу може бути використане число стандартного класу вогнестійкості. За таких умов може бути перевірена умова збереження несучої здатності, яка виражається нерівністю:

$$k_{mod,fi} \geq \mu_f, \quad (29)$$

де μ_f – коефіцієнт навантаження, що виражає відношення напружень від діючих зусиль до несучої здатності перерізу.

Для того щоб визначити фактичну межу вогнестійкості за формулами (21) – (26) можна використати послідовність процедур, що подана у вигляді схеми, наведеної на рис. 28.

При визначенні розподілів температури по перерізам залізобетонних плит товщиною 200 мм та захисним шаром 25 мм (клас бетону C25/30 та арматурою $\varnothing 12$ A500C) використані співвідношення (20) – (23). Після виконання розрахунків за рекомендаціями EN 1992-1-2 були визначені граничні пластичні моменти, що

наведені у вигляді графіків їхніх залежностей від значення часу тривалості пожежі відповідного стандартним класам вогнестійкості на рис. 29.

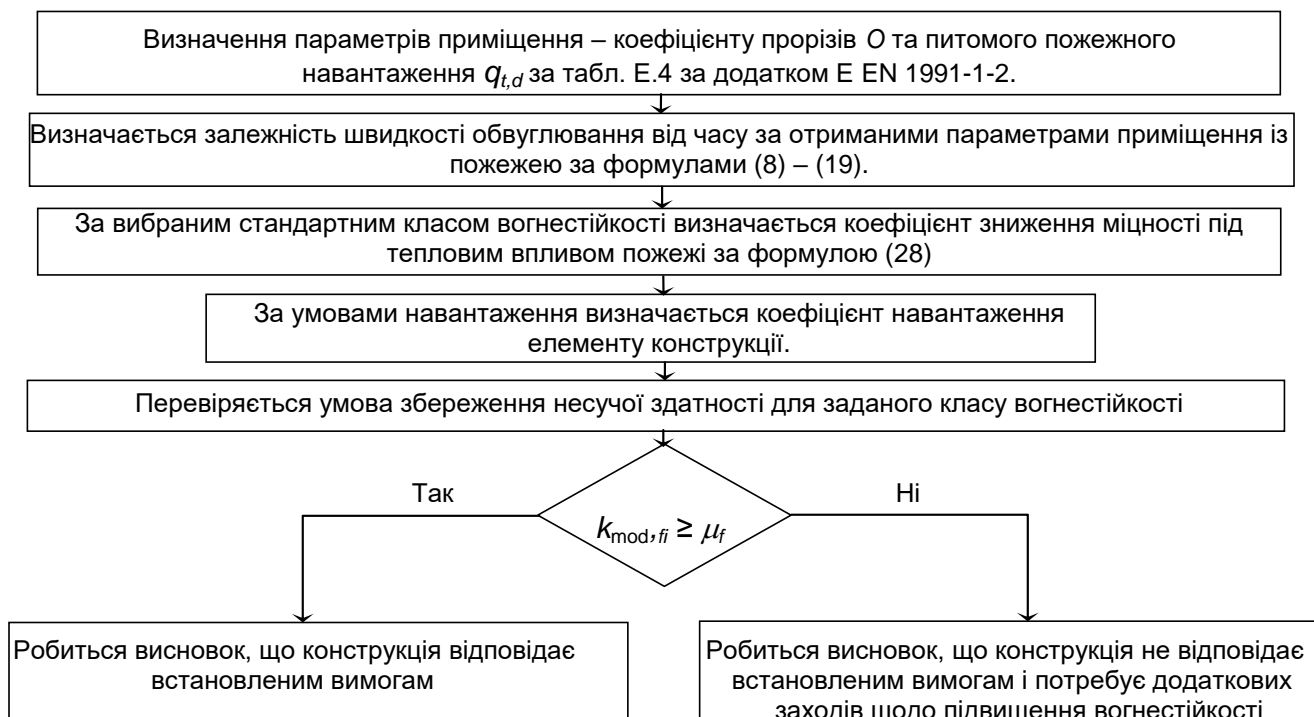


Рис. 28. Схема розрахункової методики для оцінки вогнестійкості елементів дерев'яних конструкцій за розробленим методом

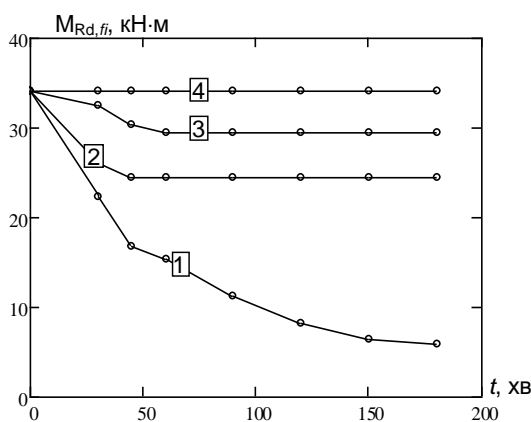


Рис. 29. Графіки залежностей граничних пластичних моментів від значення часу тривалості пожежі відповідного стандартним класам вогнестійкості для залізобетонної плити товщиною 200 мм при різних температурних режимах пожежі: 1 – стандартний температурний режим, 2 – температурний режим, розрахований при коефіцієнті прорізів $O = 0.0045 \text{ м}^{0.5}$ та щільності пожежного навантаження $q_{t,m} = 1200 \text{ МДж/м}^2$; 3 – температурний режим, розрахований при коефіцієнті прорізів $O = 0.0045 \text{ м}^{0.5}$ та щільності пожежного навантаження $q_{t,m} = 850 \text{ МДж/м}^2$; 4 – температурний режим, розрахований при коефіцієнті прорізів $O = 0.0045 \text{ м}^{0.5}$ та щільності пожежного навантаження $q_{t,m} = 500 \text{ МДж/м}^2$

Для визначення несучої здатності залізобетонної балки 240×600 та захисним шаром 30 мм (клас бетону С 20/25 та арматурою $\varnothing 25$ А500С) мають бути

використані розрахункові процедури, що описані вище. Після виконання розрахунків за рекомендаціями EN 1992-1-2 були визначені граничні пластичні моменти, що наведені у вигляді графіків їхніх залежностей від значення часу тривалості пожежі відповідного стандартним класам вогнестійкості на рис. 30.

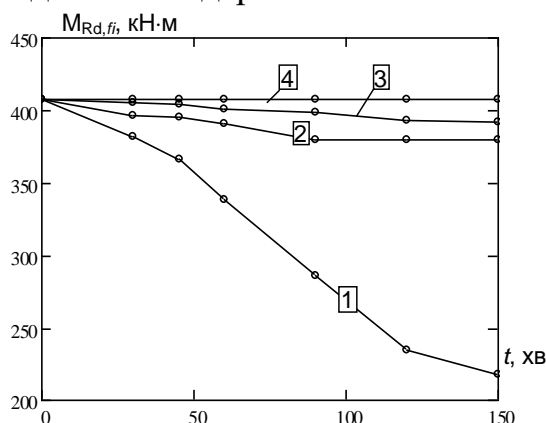


Рис. 30. Графіки залежностей граничних пластичних моментів від значення часу тривалості пожежі відповідного стандартним класам вогнестійкості для залізобетонної балки 240×600 мм при різних температурних режимах як позначено під рис. 29

Для визначення несучої здатності залізобетонної колони 400×400 та захисним шаром 50 мм (клас бетону С 20/25 та арматурою Ø30 А500С) мають бути використані розрахункові процедури, що описані вище. Після виконання розрахунків за рекомендаціями EN 1992-1-2 були визначені граничні пластичні моменти, що наведені у вигляді графіків їхніх залежностей від значення часу тривалості пожежі відповідного стандартним класам вогнестійкості на рис. 31.

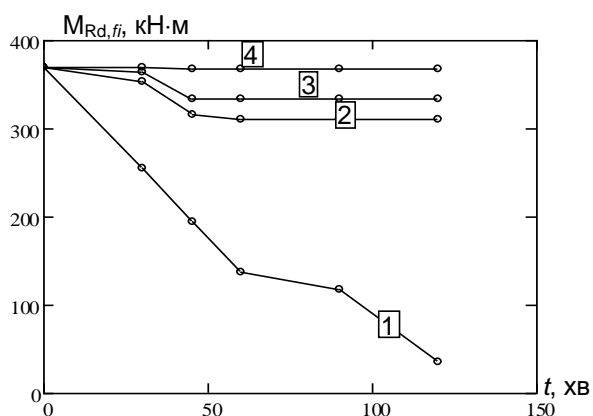


Рис. 31. Графіки залежностей граничних пластичних моментів від значення часу тривалості пожежі відповідного стандартним класам вогнестійкості для залізобетонної колони 400×400 мм при різних температурних режимах як позначено під рис. 29

Для того щоб визначити фактичну межу вогнестійкості для залізобетонних конструкцій за розробленим методом з використанням запропонованих алгоритмів обчислення температурних режимів пожеж можна використати послідовність процедур, що подана у вигляді схеми, наведеній на рис. 32.

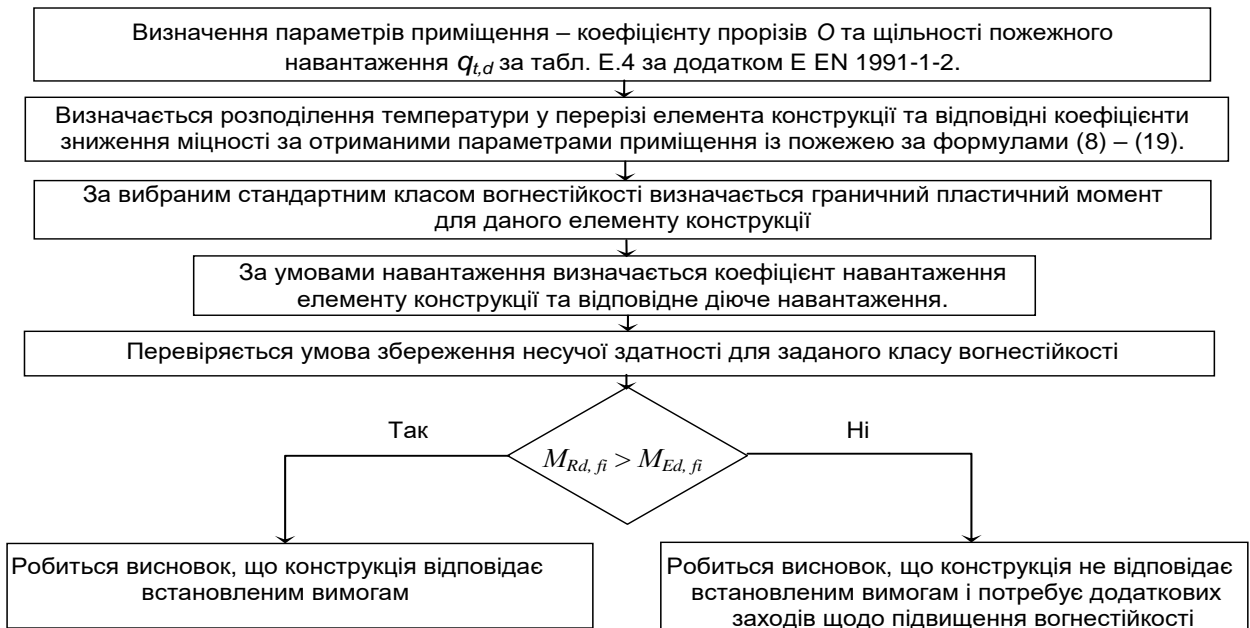


Рис. 32. Схема розрахункової методики для оцінки вогнестійкості елементів залізобетонних конструкцій за розробленим методом.

ВИСНОВКИ:

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв’язання актуальної наукової проблеми розкриття закономірностей впливу параметрів, що характеризують геометрію приміщень із пожежею, пожежне навантаження, наявність вентиляції та автоматичних систем пожежогасіння на характеристики елементів будівельних конструкцій, пов’язаних із їх здатністю зберігати свої кондиції під впливом пожежі як наукового підґрунтя щодо розвитку основ розрахункової оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій в умовах пожеж, наближених до реальних.

1. У результаті проведеного аналізу показано, що розрахункові режими реальної пожежі для досліджуваних колон мають суттєво нижчі температури за стандартний температурний режим, і різниця може складати від 400 °С до 800 °С, за рахунок врахування типу пожежного навантаження, геометрії його розташування, геометрії та положення прорізів, наявної вентиляції, наявної системи автоматичного пожежогасіння. Це приводить до невиправдано високих запасів вогнестійкості із профіцитом до 90 хв. і більше, зумовлюючи помилкові висновки щодо необхідності проведення додаткових заходів щодо вогнезахисту елементів будівельних конструкцій і зумовлених цим невиправданих трудових та матеріальних затратах на їх реалізацію, тоді як розрахунок з використанням реальних температурних режимів пожежі дозволяє їх уникнути, що підкреслює актуальність розробки таких методик.

2. Показано, що для отримання температурних режимів пожежі є ефективним застосування польової математичної моделі, заснованої на чисельному інтегруванні повної системи диференціальних рівнянь Нав’є-Стокса, доповненої відповідними моделями турбулентності, горіння, теплопереносу тепловим випромінюванням, потоків частинок, реалізованого за допомогою

методу кінцевих різниць за схемою «предиктор-коректор» у програмному середовищі комп'ютерної системи обчислювальної газодинаміки пожежі Fire Dynamic Simulator (FDS), розробленою Інститутом стандартів Сполучених Штатів Америки, оскільки розрахунки, виконані за рекомендаціями існуючих стандартів за умов номінального теплового впливу пожежі за стандартним температурним режимом пожежі, визначають межі вогнестійкості колон, що не відповідають найнижчому нормованому класу вогнестійкості R 60, тоді як при врахуванні всіх реальних факторів колона може відповідати навіть самим жорстким вимогам класу R 150.

3. Обґрунтована методика експериментальних досліджень, що включає вивчення розподілів температури у просторі приміщень із пожежею і у внутрішніх шарах елементів огорожувальних та несучих конструкцій натурних моделей приміщень із пожежею триповерхової будівлі із залізобетонними крупнопанельними конструкціями та зменшених моделей приміщень із пожежею з обґрунтуванням розмірів цих приміщень, їх прорізів та пожежного навантаження.

4. Обґрунтована методика вимірювання температур у моделях приміщень із використанням тепловізійних досліджень із застосуванням із термоконтрастними елементами, а також вивчення параметрів залишкової міцності бетону конструкцій, геометрії та ширини розкриття тріщин бетону, характер ушкоджень бетону та деформації елементів конструкцій моделей приміщень із пожежею.

5. На основі проведення пожежних випробувань на повномасштабних та зменшених моделях приміщень, дозволили отримати дані про температурні режими розвитку пожеж, виявити характер поведінки огорожувальних конструкцій, встановити особливості деструкції матеріалів будівлі при інтенсивному вогневому і довести адекватність математичних моделей лінійних регресійних залежностей від коефіцієнту прорізів (O) та щільності пожежного навантаження ($q_{t,d}$): максимальної середньооб'ємної температури пожежі: $\Theta_{\text{emax}} = 384.587 + 17281.1 \cdot O - 0.218 \cdot q_{t,d} + 1.196 \cdot O \cdot q_{t,d}$; часу її досягнення: $t_m = 101.211 + 1947.368 \cdot O - 0.1933 \cdot q_{t,d} + 3.1898 \cdot O \cdot q_{t,d}$; загальної тривалості пожежі: $\tau_m = 33.576 + 160.287 \cdot O - 2.552 \cdot q_{t,d} + 0.236 \cdot O \cdot q_{t,d}$. Оскільки абсолютна похибка результатів розробленої моделі складає не більше 20 °С, а відносна не більше 14 %, значення критерію Фішера для максимальної середньооб'ємної температури пожежі складає 1.06, для часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури пожежі значення критерію Фішера складає 1.04, для тривалості пожежі значення критерію Фішера складає 0.964 і всі значення критерію Фішера не перевищують табличного значення при рівні значущості 0.05.

6. За результатами тепловізійних вимірювань за розробленою методикою виявлено їх достатню точність та інформативність, оскільки їх точність у порівнянні із показниками термопар є достатньою (похибка не більше 16 °С) і при цьому можна контролювати більшу кількість вимірювальних точок простору без додаткового обладнання.

7. Проведені чисельні експерименти на комп'ютерних моделях приміщень триповерхової будівлі та зменшених моделей приміщень із пожежею із застосуванням методів обчислювальної газогідродинаміки, у результаті чого виявлений характер перебігу пожежі та часові залежності її основних параметрів.

Показано, що відносна похибка не перевищує 25%, а середньоквадратичне відхилення у середньому не перевищує 56 °С, а величини статистичних критеріїв Кохрена, Стьюдента та Фішера для результатів моделювання випробувань зменшених моделей приміщень із пожежею, зумовлених різницею між розрахунковими та експериментальними даними мають величини відповідно не більше 0.95, 0.805 та 1.006 і не перевищують табличних значень.

8. За результатами моделювання випробувань зменшених моделей приміщень було обґрунтовано коефіцієнти безпеки, які враховують похибку результатів комп'ютерного моделювання і дорівнюють 1.12, 1.06, 1.15 відповідно при визначенні максимальної середньооб'ємної температури, часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури та тривалості пожежі, а також було обґрунтовано масштабні коефіцієнти для значень максимальної середньооб'ємної температури, часу досягнення максимальної середньооб'ємної температури та тривалості пожежі у середньому відповідно складають 0.896, 1.344 та 1.184.

9. Виявлені закономірності впливу наявності систем автоматичного пожежогасіння систем вентиляції на параметри температурного режиму пожежі при її різних умовах і враховані при обґрунтуванні відповідних коефіцієнтів у вирази для визначення максимальної середньооб'ємної температури, часу її досягнення та тривалості пожежі.

10. Досліджено тепловий вплив температурних режимів пожежі, отриманих за запропонованими математичними моделями на механічні характеристики металевих конструкцій, у результаті чого виявлені закономірності впливу параметрів приміщень із пожежами. Показано, що при зменшенні коефіцієнту прорізів та збільшенні щільності пожежного навантаження фактична межа вогнестійкості починає зменшуватися, а також при значеннях щільності пожежного навантаження менше за 600 МДж/м² існує ділянка на якій настання граничного стану не спостерігається, і на основі отриманих закономірностей побудовані номограми для визначення межі вогнестійкості для сталевих конструкцій при стандартних значеннях критичної температури та розроблена відповідна методика.

11. Виявлені закономірності впливу параметрів приміщень із пожежею на параметри, що визначають дану лінійну залежність швидкості обвуглювання у вигляді регресійних залежностей для максимальної швидкості обвуглювання $v_{\max} = 0.648 + 30.742 \cdot O - 0.00178 \cdot q_{t,d} + 0.0239 \cdot O \cdot q_{t,d}$ та максимального часу процесу обвуглювання $t_{v_{\max}} = 26.915 + 1058.6 \cdot O - 0.0446 \cdot q_{t,d} + 0.718 \cdot O \cdot q_{t,d}$, і на основі виявлених закономірностей розроблена розрахункова методика розрахункової оцінки межі вогнестійкості зігнутих елементів дерев'яних конструкцій.

12. Досліджені розподілення температури у перерізах залізобетонних конструкцій за умов теплового впливу температурного режиму пожежі за запропонованими математичними моделями, що були використані для визначення розподілу знижених механічних характеристик, на основі чого виявлені закономірності граничних пластичних моментів для монолітних залізобетонних плит, балок та колон і побудовані діаграми граничних моментів для них, що дозволяють перевіряти умови міцності та оцінювати належність даних елементів залізобетонних конструкцій до відповідного стандартного класу вогнестійкості.

13. Комплекс розробленого математичного забезпечення щодо розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій із застосуванням температурних режимів пожежі, наближених до реальних дозволяє обґрунтування використання існуючих проектних рішень без передбачення систем вогнезахисту, і за рахунок цього суттєве скорочення витрат враховуючи, що вартість робіт щодо облаштування вогнезахисту у середньому складає 1.5 % - 2 % від загальної вартості всього будівництва.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у вітчизняних наукових фахових виданнях

1. Шналь Т.Н. Огнестойкость металлических элементов конструкций, защищенных вспучивающимся покрытием / Ю.И. Орловский, Т.Н. Шналь // Известия Вузов. Строительство. –1997. -№10. -С.7-10.

2. Шналь Т.М. Вогнестійкість металевих елементів конструкцій захищених спучуваним покриттям // Збірник наукових статей проблеми теорії і практики будівництва. -Том II. – Львів: Вид. ДУ "Львівська політехніка". –1997. –С.96-97.

3. Шналь Т.М. Про можливість застосування вогнезахисного покриття для підвищення вогнестійкості теплоізоляції із пінопласту // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. – Львів: Видавництво Державного університету "Львівська політехніка". – 1998. - №360. – С. 289-295.

4. Шналь Т.Н. Огнестойкость железобетонных плит, защищенных вспучивающимся покрытием / Ю.И. Орловский, В.В. Соломонов, Т.Н. Шналь, А.В. Мантюренко // Бетон и железобетон. –1998. -№3/4. -С.4-7.

5. Шналь Т.М. Підвищення пожежої безпеки будівель та споруд вогнезахисними спучуваними покриттями пожежі / Ю.І. Орловский, Т.М. Шналь // Міжвідомчий науково-технічний збірник. Будівельні конструкції. Випуск 51. — Київ: НДІБК, 1999. — С.212-214.

6. Шналь Т.М. До питання вогнезахисту залізобетонних конструкцій спучуваними покриттями / Т.М. Шналь, В.В. Власов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету. – 2000. – С. 283-287.

7. Шналь Т.Н. О возможности применения огнезащитного вспучивающегося покрытия для повышения огнестойкости теплоизоляции из пенопластов // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Композиційні матеріали для будівництва. - №2000-2(22).– Донецьк, – 2000. – С. 103-106.

8. Шналь Т.М. Дослідження причин крихкого руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій при пожежі // Збірник наукових праць "Ресурсоекономні матеріали, конструкції та споруди". Вип. 7 - Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету. – 2001. — С.232-237.

9. Шналь Т. Деструкція вогнезахисних покриттів при дії високих температур / Т. Шналь, В. Власов // Збірник матеріалів VI міжнародної конференції "Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля". Частина 1. Будівництво. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка". – 2001.- С.478-483.

10. Шналь Т.М. Дослідження деструкції вогнезахисних спучуваних покриттів у процесі термічного розширення компонентів / Т.М. Шналь, Ю.Е. Павлюк,

О.Р. Гірняк, В.В. Кірпічник // Збірник наукових праць: "Пожежна безпека". – №1. - Львів: "Сполом", - 2001. – С. 412-414.

11. Шналь Т.М. Термічна деструкція полімерних композитів, модифікованих сполуками, які містять сурму / Ю.І. Орловський, К.В. Орловська, Т.М. Шналь // Збірник наукових праць: "Пожежна безпека". – №1. - Львів: "Сполом". - 2001. – С. 368-370.

12. Шналь Т.М. Підвищення вогнестійкості конструкцій будівель та споруд вогнезахисними покриттями / Ю.І. Орловський, Т.М. Шналь, Ю.Е. Павлюк // Збірник наукових праць: "Пожежна безпека". – №2. – Львів: ЛПБ, УкрНДІПБ МВС України - 2002. - С. 50-55.

13. Шналь Т.М. Технічна діагностика та подальша експлуатація залізобетонних конструкцій після пожежі / Т.М. Шналь, В.І. Хоржевський, Ю.Е. Павлюк, Р.В. Пархоменко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Теорія і практика будівництва. - №441. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". – 2002. – С. 184-189.

14. Шналь Т.М. Універсальна піч для вогневих випробувань будівельних конструкцій / Б.Г. Демчина, Т.М. Шналь, В.С. Фіцик, А.П. Половко // Таврійський науковий вісник. Вип.23. – Херсон: Херсонський агроуніверситет, Айлант. – 2002. – Вип. 23. - С. 165-168.

15. Шналь Т.М. Розрахунок нагріву незахищених поверхонь металевих конструкцій та впливу вогнезахисної ізоляції у відповідності до Європейських норм / Ю.І. Орловський, Т.М. Шналь, Ю.Е. Павлюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". – 2004. - №495. – С.140-146.

16. Шналь Т.М. Дослідження ефективності вогнезахисних композиційних матеріалів з використанням акустичної емісії / Т.М. Шналь, Ю.І. Орловський, Б.Г. Демчина, П.М. Коваль // Збірник наукових статей "Ресурсоекономні матеріали, конструкції та споруди". Вип. 12 - Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування. – 2005. — С.79-84.

17. Шналь Т.М. Оцінка стану залізобетонних конструкцій після впливу тривалого високотемпературного навантаження / Т.М. Шналь, І.І. Кархут // Збірник наукових праць "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті". Вип. 77 - Харків: Видавництво Української державної академії залізничного транспорту. – 2006. — С.153-158.

18. Шналь Т.М. Температурний розвиток пожежі в одноповерховій промисловій будівлі з залізобетонним каркасом / Т.М. Шналь, Ю.Е. Павлюк, М.І. Стасюк, І.І. Кархут, Б.С. Штангрет // Пожежна безпека. - Львів: ЛПБ, УкрНДІПБ МНС України, 2007. - №10.-С.12-16.

19. Шналь Т.М. Повномасштабні пожежні випробування фрагменту великопанельної будівлі / Т.М. Шналь, М.С. Коваль, Б.Г. Демчина, П.М. Коваль, І.І. Кархут // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – 2008. – № 627. – С. 208–212.

20. Шналь Т.М. Аналіз методів проведення натурних випробувань на вогнестійкість будівель і споруд / Т.М. Шналь, І.П. Синенько, Д.А. Ясінський //

Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – 2010. – № 664. – С. 357–362.

21. Шналь Т.М. Характеристика моделей розвитку пожеж / Т.М. Шналь, І.П. Синенько, М.І. Стасюк // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – 2011. – № 697. – С. 252–256.

22. Шналь Т.М. Дослідження температурного режиму пожежі у модельному приміщенні / І.П. Данкевич, Т.М. Шналь, Б.Г. Демчина // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – 2012. – № 742. – С. 46–51.

23. Шналь Т.М. Вплив розташування отворів та пожежної навантаги на температурні режими пожеж у модельних приміщеннях / І.П. Данкевич, С.В. Прохоренко, Т.М. Шналь, Т.Б. Юзьків // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2012. – № 2 (26). – С. 138–143.

24. Шналь Т.М. Дослідження виходу факелу полум'я через отвори під час розвитку пожежі у приміщенні / І.П. Данкевич, С.В. Прохоренко, Т.М. Шналь // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – 2013. – № 755. – С. 106–110.

25. Шналь Т.М. Дослідження нагріву огорожувальних конструкцій під час пожежі у житловому приміщенні / І.П. Данкевич, С.В. Прохоренко, Т.М. Шналь, Т.Б. Юзьків, О.М. Коваль // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2013. – № 1 (27). – С. 167–172.

26. Шналь Т.М. Комплексна методика оцінки термічних параметрів дії вогневого навантаження на огорожувальні конструктивні елементи житлових приміщень / С.В. Прохоренко, І.П. Данкевич, Т.М. Шналь, К.П. Кашпор // Міжвідомчий збірник «Вимірювальна техніка та метрологія». – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2013. – № 74. – С. 37–39.

27. Шналь Т.М. Дослідження температурних режимів пожеж у житлових приміщеннях на моделях зменшеного масштабу / Т.М. Шналь, С.В. Прохоренко, І.П. Данкевич // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – 2016. – № 844. – С. 232–236. (**Index Copernicus**)

28. Шналь Т.М. Методика досліджень залізобетонних балок з пошкодженнями, отриманими за дії навантаження / Б.Р. Турчин, З.З. Бліхарський, П.І. Вегера, Т.М. Шналь // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – 2018. – № 877. – С. 212–217. (**Index Copernicus**)

29. Шналь Т.М. Вплив дефектів робочої арматури на несучу здатність залізобетонних балок / З.З. Бліхарський, П.І. Вегера, Т.М. Шналь // Дата публікації 2018/2/26 Журнал Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва Випуск 888 С. 12-17. (**Index Copernicus**)

Статті у міжнародних фахових виданнях

30. Taras Shnal The influence of the damaged reinforcing bars on the stress-strain state of the reinforced concrete beams / Zenoviy Blikharskyu, Taras Shnal, Roman Khmil // Production Engineering Archives. 2017, Vol. 14, p 23-26. (**Index Copernicus**), ISSN: 2353-5156, DOI: 10.30657/pea.2017.14.06

31. Taras Shnal Fracture toughness of RC beams on the shear, strengthening by FRCC system / Zinoviy Blikharskyu, Pavlo Vegera, Rostyslav Vashkevych and

Taras Shnal //MATEC Web Conf. Volume 183, 2018, 12th International Conference Quality Production Improvement – QPI 2018 Article Number 02009 Number of page(s) 6 <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818302009> (Scopus), E-ISSN:2261-236X

Патенти

32. Пат. 38256 А Україна, МКИ С09D5/08, С09D1/00. Вогнезахисне покриття / Ю.І. Орловський, Б.Г. Демчина, Т.М. Шналь; Національний університет “Львівська політехніка”. - № 2000063434; Заявл. 12.06.2000; Опубл. 15.05.2001, Бюл. №4.- 2с.

33. Пат. 47993 А Україна, МКИ С09D5/18, С09D1/00. Вогнезахисне покриття / Ю.І. Орловський, Б.Г. Демчина, Т.М. Шналь, Ю.Е. Павлюк, В.С. Фіцик, Р.В. Пархоменко; Національний університет “Львівська політехніка”. - № 2002021601; Заявл. 26.02.2002; Опубл. 15.07.2002, Бюл. №7.- 2с.

34. Пат. 48870 А Україна, МКИ F23M5/02. Піч для вогневих випробувань будівельних конструкцій / Б.Г. Демчина, Ю.І. Орловський, Т.М. Шналь, А.П. Половко, В.С. Фіцик; Національний університет “Львівська політехніка”. - № 2002021132; Заявл. 12.02.2002; Опубл. 15.08.2002, Бюл. №8.- 2с.

35. Пат. 89421 МПК: G01J 5/60 Спосіб створення оптичного контрасту для тепловізійних приладів/ С.В. Прохоренко, І.П. Данкевич, О.В. Бардаков, Т.М. Шналь, Маріуш Возний Національний університет “Львівська політехніка”. - № и 201310593; Заявл. 02.09.2013; Опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.- 3с.

Матеріали науково-технічних конференцій

36. Shnal T. Effective fireproof coating for metal structures // Proceeding 6th the International Scientific Conference - Kosice, 1997.

37. Shnal T. Fire resistance of reinforced concrete plates protected with a bloated coating / Y. Orlovskiy, T. Shnal // Proc. International Conf. "Concrete and concrete structures". – Zilina (Slovakia). -1999. - P.199-204.

38. Shnal T. Fire resistivity of steel and aluminium constructions protected by a bloated coating / Y. Orlovsky, K. Orlovska, T. Shnal // Proc. Fourth international conference on steel and aluminium structures ICSAS'99. - Helsinki (Finland). –1999. – P.561-566..

39. Шналь Т.М. Дослідження температурно-зсідних деформацій та монолітності системи "бетон-вогнезахисне покриття" / Т.М. Шналь, Б.Л. Назаревич, В.В. Власов // V Konferencja Naukowa Rzeszowsko-Lwowsko-Koszycka: Aktualne Problemy Budownictwa i Inzynierii Srodowiska. - Rzeszow (Polska). –2000. – P.525-529.

40. Shnal T.M. Bloated coating for protection of constructions from fire / T.M. Shnal, Y.I. Orlovsky, W.N. Rashchynsky, B.L. Nasarevytsh // XII konferencja naukowo-techniczna "Kontra'2000". Durability of buildings and protection against corrosion. - Warszawa-Zakopane (Poland). – 2000. - P.321-326.

41. Shnal T. Research into the causes of brittle failure of concrete and reinforced concrete construction during fire / Y. Orlovsky, T. Shnal, V.I. Horzewsky, V.V. Vlasov // Proc. 9th International Expertcentrum Conf. On Failures of Concrete Structures. Edited by E.Javor – Bratislava (Slovakia). – 2001. – S.23-28.

42. Shnal T. Relation between concrete structure and its crack resistance under the influence of raised and high temperatures / Y. Orlovsky, K. Orlovska, T. Shnal,

Y. Pavliuk // Proc. International Symp. "Non - Traditional Cements & Concrete". – Brno (Czech Republic). – 2002.-S.200-208.

43. Shnal T. Relation between concrete structure and its crack resistance under the influence of raised and high temperatures / Y. Orlovsky, T. Shnal, Y. Pavliuk // Konferencja naukowo-techniczna: "Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa". – Olsztyn-Lansk (Poland): Warminsko-Mazurski Uniwersytet, – 2002. – P.517-528.

44. Shnal T. Relation between concrete structure and its crack resistance under the influence of raised and high temperatures / T. Shnal, Y. Pavliuk, R. Parhomenko // Proc. of the International Conf. "Construction and Architecture". Durability design and fracture mechanics of concrete structures. – Minsk (Belarus). – 2003. – P. 155-167.

45. Шналь Т.Н. Исследование огнестойкости серных мастик и бетонов / Ю.И. Орловский, Т.Н. Шналь, В.В. Власов // Материалы всероссийской XXXI научно-технической конференции "Актуальные проблемы современного строительства. Ч.1. Строительные материалы и изделия. Экология, инженерные системы, сооружения и технологии. – Пенза (Россия). – 2001.- С.61-63.

46. T. Sznal. Rozwoj temperaturowy pożaru w jednokodygnacyjnym budynku przemyslowym o zelbetowym szkielecie / M. Kowal, T. Sznal // Konferencja naukowo-techniczna. Scenariusze pożarowe a inzynieria bezpieczenstwa pożarowego.-Zakopane.- 26-28 pazdziernika 2006 r.-P.16-23.

47. Шналь Т.М. Аналіз методик експериментального дослідження пожеж у приміщеннях / Т.М. Шналь, І.П. Данкевич, Д.А. Ясінський // Техногенна безпека: теорія, практика, інновації: Зб. тез II міжнар. наук.-практ. конф. – Львів: ЛДУ БЖД, 2011. – С. 159–163.

48. Шналь Т.М. Оцінка прогріву тонкостінної огорожувальної конструкції в умовах натурної пожежі / С.В. Прохоренко, І.П. Данкевич, Т.М. Шналь // Одинадцята відкрита наукова конференція ІМФН: Збірник матеріалів та програма конференції [«PSC-IMFS-11»], (Львів, 13–14 червня 2013 р.). – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2013.– С. 124–125.

49. Шналь Т.М. Вимірювання температур у закритих об'ємах за умов пожежі / І.М. Данкевич, Т.М. Шналь, С.В. Прохоренко [та ін.] // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Системи 2013 – Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань». – Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2013. – С. 50.

АНОТАЦІЯ

Шналь Т. М. Розвиток наукових основ розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за умов впливу параметричних температурних режимів пожеж. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – «пожежна безпека». Національний університет цивільного захисту України, Державна служба з надзвичайних ситуацій, Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розв'язання актуальної наукової проблеми розкриття закономірностей впливу параметрів, що характеризують геометрію

приміщень із пожежею, пожежне навантаження, наявність вентиляції та автоматичних систем пожежогасіння на характеристики елементів будівельних конструкцій, пов'язаних із їх здатністю зберігати свої кондиції під впливом пожежі як наукового підґрунтя щодо розвитку основ розрахункової оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій в умовах пожеж, наближених до реальних.

При цьому встановлені математичні співвідношення що описують залежності від коефіцієнту прорізів та питомого пожежного навантаження та максимальної середньооб'ємної температури пожежі. Запропонована система коефіцієнтів до математичних співвідношень для побудування температурного режиму пожежі із врахуванням впливу масштабу експериментальних моделей приміщень для їх встановлення, наявності систем автоматичного пожежогасіння та систем вентиляції.

Описані встановлені закономірності впливу параметрів приміщень із пожежею на параметри, що визначають залежність параметрів елементів сталевих, дерев'яних та залізобетонних будівельних конструкцій, що впливають на їх вогнестійкість і на основі виявлених закономірностей розроблені відповідні розрахункові методики оцінки межі вогнестійкості даних конструкцій.

Практичний результат роботи полягає у створенні наукових основ для розробки методичної бази щодо розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за умов впливу пожежі із температурним режимом, наближеним до реального, що дозволяє обґрунтування використання існуючих проектних рішень без передбачення систем вогнезахисту і за рахунок цього суттєве скорочення витрат, враховуючи, що вартість робіт при облаштуванні вогнезахисту у середньому складає 1.5 % - 2 % від загальної вартості всього будівництва. Розроблена методична база може бути підґрунтям щодо удосконалення системи норм та стандартів для проектування вогнестійких будівельних конструкцій із гнучким підходом з врахуванням специфіки досліджуваних об'єктів будівництва.

Ключові слова: параметричний режим пожежі, обчислювальні методи газодинаміки, межа вогнестійкості, сталеві конструкції, дерев'яні конструкції, залізобетонні конструкції.

АННОТАЦИЯ

Шналь Т. М. Развитие научных основ расчетной оценки огнестойкости строительных конструкций в условиях воздействия параметрических температурных режимов пожаров. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 21.06.02 – пожарная безопасность. Национальный университет гражданской защиты Украины, Государственная служба по чрезвычайным ситуациям, Харьков, 2019.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной проблемы раскрытия закономерностей влияния параметров, которые характеризуют геометрию помещений с пожаром, пожарную нагрузку, наличие вентиляции и автоматических систем пожаротушения на характеристики элементов строительных конструкций, связанных с их способностью сохранять свои кондиции под влиянием пожара как научных основ развития методов

расчетной оценки огнестойкости элементов строительных конструкций в условиях пожара, приближенных к реальным.

При этом установлены математические соотношения, которые описывают зависимости от коэффициента проемов и удельной пожарной нагрузки и максимальной среднеобъемной температуры пожара. Предложена система коэффициентов математических соотношений для построения температурных режимов пожаров с учетом влияния масштаба экспериментальных моделей помещений, с помощью которых они установлены, наличия систем автоматического пожаротушения и систем вентиляции.

Описаны выявленные закономерности влияния параметров помещений с пожаром на параметры, которые определяют зависимость характеристик элементов стальных, деревянных и железобетонных строительных конструкций, влияющих на них огнестойкость и на основе выявленных закономерностей разработаны соответствующие расчетные методики оценки пределов огнестойкости данных конструкций.

Практический результат работы состоит в создании научных основ для разработки методической базы расчетной оценки огнестойкости строительных конструкций при условиях воздействия пожара с температурным режимом, приближенным к реальному, что позволяет обоснование использования существующих проектных решений без предусмотрения систем огнезащиты и за счет этого существенное сокращение затрат, учитывая, что стоимость работ при обустройстве огнезащиты в среднем составляет 1.5 % - 2 % от общей стоимости всего строительства. Разработанная методическая база может быть основой усовершенствования системы норм и стандартов проектирования огнестойких строительных конструкций с гибким подходом с учетом специфики исследуемых объектов строительства.

Ключевые слова: параметрический режим пожара, вычислительные методы газодинамики, предел огнестойкости, стальные конструкции, деревянные конструкции, железобетонные конструкции.

ABSTRACT

Shnal T. M. Development of scientific principles to calculating evaluate of building structures fire resistance under condition of parametric temperature fire regime. – Manuscript.

The dissertation work dedicated to solving actual scientific problem of uncovering of relation regularities of building structures capacity to save their features under fire condition with geometric parameters of compartment with fire, fire loads, presence of fire automatic and ventilation system. These regularities serve as ground for development of scientific principles to calculating evaluate of building structures fire resistance under condition of temperature fire regime, approximated to natural condition.

The fire tests was conducted at the full scale models and diminished models of compartments with fire and as a result of it can be pointed data about fire temperature regimes and behavior characters of confine structures: wall panels and floor slab, find out features of building material destroy under intensity fire influence and improve

adequate of linear regress relative mathematical models with rate of openings (O) and density of fire loads ($q_{t,d}$).

The experiments of full scale tests modeling for three floors building and diminished models with use means of computer fluid dynamics was conducted and the fire process character and time relative of main fire parameters was find out.

Considering the computer modeling results for fire in compartments with automatic fire and venting systems the relative regularity influence of this on fire temperature regimes parameters which was considered for ground corresponding rates for determine of the highest mean volume temperature, the time of reaching to it and the general duration of fire

Heat impact of fire temperature regimes calculated with use offered mathematical models on mechanical features of steel structures was researched and as the result of this research there can be pointed finding out relations regularity of fire temperature regime parameters with parameters of compartments with fire. On the ground gotten regularity the special nomograms have been built and corresponding method has been developed.

On the ground of elements wooden structures cross-sections heating there has been found out influence regularity of parameters for compartments with fire on parameters which determine charring wooden rate linear relation as regress relations of the highest charring rate and the longest time of charring process. With use this relations calculate method of wooden beams fire resistance evaluate was developed.

In this work the temperature spreading in reinforced concrete structures elements cross-sections under impact conditions of fire temperature regime calculated with use offered mathematical models was research. On the ground of these spreading, the decreased mechanical characteristic spreading was gotten. As result of this research there can be pointed that plastic limit moments relations with time was found out for reinforced concrete slabs, beams and columns and this lets to check strength condition and evaluate belonging of this elements to corresponding standard class of fire resistance.

By this way the actual scientific problem of uncovering impact regularity of compartments geometric parameters, compartments openings geometric parameters, type and location fire loads, presence venting and automatic fire systems on building structures fire resistance characteristics has been solved. Solving of this problem is scientific ground for principle development of building structures fire resistance evaluating by calculate under condition of fire, approximated to real conditions.

Keywords: fire parametric regime, fire temperature calculation, computational fluid dynamics methods, fire resistance limit, steel structures, wooden structures, reinforced concrete structures.