

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

КРОПИВА МИХАЙЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 624.012

**УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ  
ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ІЗ ВНУТРІШНІМИ  
ДВУТАВРОВИМИ СТАЛЕВИМИ БАЛКАМИ**

Спеціальність 21.06.02 – пожежна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Поздєєв Сергій Валерійович**, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, головний науковий співробітник відділу науково-дослідних робіт.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Гивлюд Микола Миколайович**, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри будівельного виробництва.  
кандидат технічних наук **Субота Андрій Вікторович**, ДВНЗ «Ужгородський національний університет» доцент кафедри міського будівництва і господарства.

Захист відбудеться «06» жовтня 2016 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради *K 35.874.01* в Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент

В. М. Баланюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Статистика пожеж та нещасних випадків, які пов'язані із пожежами, свідчить, що одним з найбільш небезпечних чинників є руйнація несучих сталобетонних та сталезалізобетонних будівельних конструкцій. Одним з ефективних заходів забезпечення вогнестійкості таких конструкцій є впровадження сучасних розрахункових методів, у тому числі рекомендованих європейськими будівельними нормативними документами – єврокодами.

Одним із розрахункових методів інженерного оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій є табличний метод. Застосування такого методу є обмеженим, оскільки на теперішній час не існує відповідних таблиць для багатьох типів сталезалізобетонних конструкцій, до яких відносяться також і сталезалізобетонні плити із внутрішніми сталевими двотавровими елементами, і які набули поширеного застосування останнім часом завдяки високій несучій здатності та підвищеній вогнестійкості.

При розробці таблиць для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій використовується метод стандартних випробувань на вогнестійкість. Але його застосування пов'язано із суттєвими матеріальними та трудовими затратами. Більш ефективним для цього є застосування розрахункових методів підвищеної точності, до яких відноситься, зокрема, метод кінцевих елементів. Удосконалення табличного розрахункового методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми сталевими двотавровими елементами може бути досягнуто на основі математичного моделювання із застосуванням методу кінцевих елементів.

є актуальною науковою задачею.

**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 «Прогнозування технічного стану будівельних конструкцій при дії силових, деформаційних та високотемпературних впливів» (номер державної реєстрації 0113U004019), в якій здобувач був виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у забезпеченні нормованої вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками шляхом застосування удосконаленого розрахункового методу оцінювання класу їх вогнестійкості на підставі розроблених довідникових таблиць з переліком необхідних параметрів, визначених за результатами моделювання з використанням методу кінцевих елементів.

**Мета й задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розкриття закономірностей залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних характеристик

та діючого механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі як підґрунтя удосконалення табличного методу її оцінювання.

**Для досягнення поставленої мети поставлено до розв'язку такі завдання:**

- провести аналіз сучасного стану забезпечення і методів оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит та виявити шляхи їх удосконалення;
- розробити методику і провести математичне моделювання поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі;
- розробити методику і провести експериментальні дослідження поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі;
- провести перевірку адекватності результатів математичного моделювання процесів деформації, руйнування з втратою вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень;
- з урахуванням виявленої залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару і механічного навантаження побудувати математичну модель, провести повний факторний експеримент та створити довідникову таблицю для визначення класу їх вогнестійкості;
- розробити удосконалений табличний метод оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками.

**Об'єкт дослідження** – процеси деформації, руйнування з втратою вогнестійкості, що відбуваються у сталезалізобетонних плитах із внутрішніми двотавровими сталевими балками під час впливу на них стандартного температурного режиму пожежі.

**Предмет дослідження** – закономірності змінення значення межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару та механічного навантаження під час впливу стандартного температурного режиму пожежі.

**Методи дослідження.** Дослідження процесів деформування, руйнування та втрати вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками проводили розрахунковим, а також експериментальним методом із застосуванням випробувальної вогневої печі. Для встановлення основних закономірностей змінення значення межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару та механічного навантаження був використаний метод математичного моделювання. Для розробки довідникової таблиці визначення класу їх вогнестійкості проведено повний факторний

експеримент. Вивчення достовірності та адекватності результатів експериментів і моделювання поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі використані методи математичного моделювання.

**Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає у розкритті закономірностей залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних характеристик та діючого механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. При цьому:

- уперше виявлена закономірність залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити із внутрішніми двотавровими сталевими балками ( $y$ ) від висоти двотавра ( $x_1$ ), товщини його захисного шару ( $x_2$ ) та прикладеного до плити механічного навантаження ( $x_3$ ), яка виражається залежністю  $y = 254.25 + 148.25x_1 + 24x_2 - 55.75x_3 + 8.5x_1x_2 - 20.75x_1x_3 + 2.5x_2x_3 + 4x_1x_2x_3$ ;

- удосконалено табличний метод оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонної плити із внутрішніми двотавровими сталевими балками шляхом створення довідникових таблиць з вимогами щодо необхідних геометричних параметрів, товщини захисного шару та механічного навантаження для забезпечення нормованої вогнестійкості;

- отримало подальшого розвитку застосування розрахункових інженерних методик оцінювання межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** підтверджується логічним викладенням та відповідністю поставлених для досягнення визначеної мети досліджень і завдань і методів їх розв'язання, заснованих на загальноновизнаних 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 14 %, 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 розробці удосконаленого табличного методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом, що дозволяє встановити мінімальні проектні розміри для забезпечення необхідного класу вогнестійкості. Це дозволяє уникнути матеріальних та трудових затрат на проведення вогневих випробувань або здійснення великого обсягу розрахунків при використанні уточнених розрахункових методів. Отримана

таблиця мінімальних розмірів сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками може доповнити табличні дані нормативних документів, що регламентують розрахункові табличні методи оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій.

Розроблені методики впроваджені у технологічний процес випробувань у Випробувальному центрі «Пожтест» с.м.т. Любарці Київської обл., діяльність Управління ДСНС України у Черкаській обл., а також у навчальний процес Академії пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля при викладанні дисципліни «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі».

**Особистий внесок здобувача.** полягає у аналізі літературних джерел, підготовці та проведенні випробувань, обробці отриманих даних, розробці способів інтерполяції температур у вузлових точках перерізу сталезалізобетонних плит та ідентифікації коефіцієнтів роботи її основного матеріалу за результатами вогневих випробувань, розробці способів визначення межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит за математичною моделлю їх напружено-деформованого стану в умовах нагріву та оцінці адекватності результатів, отриманих на основі удосконаленого методу.

#### **Апробація результатів дисертації.**

- IV Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій (м. Черкаси, 2013 р.)
- Всеукраїнській науково-практичній конференції «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки» (м. Харків, 2013 р.)
- 16 Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників (м. Київ, 2014 р.);
- VI Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2014р.);
- V міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідація надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2013 р.).
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів(теорія і практика)». (м. Харків 2015 р.)

**Публікації.** Основний зміст роботи викладено в 6 наукових статтях, із них 5 опубліковано у виданнях, внесених до переліку ДАК України, 1 стаття опублікована у закордонному науковому журналі, а також у тезах 6 доповідей на науково-практичних конференціях і семінарах.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів і загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 130 найменувань; містить 143 сторінки друкованого тексту, 35 таблиць, 77 рисунків й 3 додатки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

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

У першому розділі проведено огляд нормативних документів і наукових розробок щодо експериментальних та розрахункових методів оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит із сталевим елементом стандартного профілю усередині та виявлено шляхи удосконалення табличного метода оцінки їх вогнестійкості.

У роботах відомих дослідників А.І. Яковлева, В.П. Бушева, В.А. Пчелінцева, В.М. Ройтмана, А.Ф. Мілованова, С.Л. Фоміна, В.Л. Страхова, П.Г. Круковського, С.В. Новака, О.В. Некори, С.В. Поздеева, В.Г. Поклонського, М.М. Семерака, Б.Г. Демчини, Е.М. Гуліди, В.В. Ніжника, Т.М. Шналя, А.П. Половка, А.С. Белікова, Т. Lie, В. Bartelemi, G. Kruppa, Т. Harmathy, М. Schäfer, D. Bernhart та ін. висвітлено або застосовано основні підходи щодо оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит. Один підхід полягає у проведенні стандартних вогневих випробувань натурних зразків в установках з вогневими печами з прикладеним до них навантаженням, відповідним діючим на реальні конструкції. Такий підхід є точним та достовірним, але при цьому він дуже високовартісний та трудомісткий. Інший підхід заснований на застосуванні розрахункових методів. Даний підхід є набагато менш затратним та трудомістким, але при його застосуванні існує можливість виникнення істотних похибок. Серед розрахункових методів найбільш продуктивним є табличний метод, але його повсюдне застосування стримується суттєвим обмеженням табличного матеріалу для багатьох сталезалізобетонних конструкцій.

При формуванні довідникових таблиць для здійснення оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит метод вогневих випробувань є малоефективним, оскільки розуміє проведення великої кількості експериментів, які мають високу вартість та трудомісткість. Для напрацювання табличних даних щодо вогнестійкості сталезалізобетонних плит перспективним є використання уточнених розрахункових методів, що засновані на методі кінцевих елементів (МКЕ). Застосування такого підходу дозволяє створення довідникових таблиць для визначення вогнестійкості сталезалізобетонних плит із сталевим елементом стандартного профілю усередині. Дані довідникові таблиці можуть бути використані як додаток до будівельних розрахункових стандартів для визначення проектної вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій.

У другому розділі наведені результати математичного моделювання поведінки сталезалізобетонної плити із сталевим двотавровим елементом в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом. На рис. 1 наведена схема армування та розрахункова схема означеної сталезалізобетонної плити.

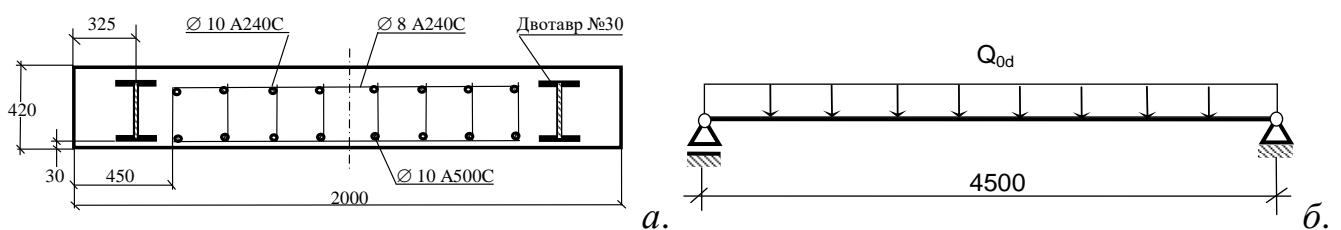


Рис. 1. Схема армування перерізу сталезалізобетонної плити (а) та її розрахункова схема (б).

Моделювання поведінки сталезалізобетонної плити відбувається при послідовному вирішенні теплотехнічної задачі та задачі міцності. Результати розв'язку теплотехнічної задачі використовуються для розв'язку задачі міцності при використанні розрахованих вузлових температур в якості навантаження.

Для проведення розрахунку були використані математичні моделі, параметри яких подані у табл. 1.

Таблиця 1

### Основні математичні моделі для розрахунків стіни на вогнестійкість

Особливість процесу	Використана математична модель (метод)
Теплотехнічна задача	
Теплопровідність	Рівняння нестационарної теплопровідності разом з МКЕ
Граничні умови	III роду
Фізична нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона
Теплофізичні характеристики	Температурні залежності згідно із 2 частиною Eurocode 4
Параметри граничних умов	Параметри згідно із 2 частиною Eurocode 1
Задача міцності	
Напружено-деформований стан	МКЕ
Пластичне деформування	Асоціативна теорія пластичного деформування Бесселінга
Тріщиноутворення	Складений критерій міцності бетону Віллема і Варнке
Нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона
Механічні та термомеханічні х-ки	Діаграми деформування згідно із 2 частиною Eurocode 4

На рис. 2 наведені кінцево-елементні схеми для теплотехнічної та міцнісної задач із прикладеними граничними умовами

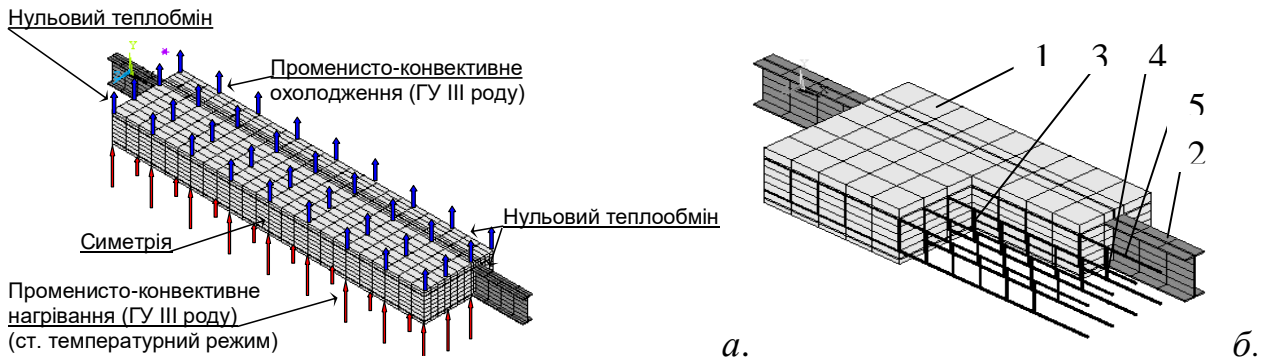


Рис 2. Кінцево-елементна схема до теплової (а) та статичної (б) задач: 1 – кінцевий елемент бетону, 2 – кінцевий елемент сталевого двотаврового елемента, 3 – кінцевий елемент арматури  $d=8$  мм, 4 – кінцевий елемент арматури  $d=10$  мм, 5 – кінцевий елемент арматури  $d=12$  мм.

У результаті розв'язку теплотехнічної задачі були отримані температурні розподілення, що наведені на рис. 3. Отримані температури були прикладені до кінцево-елементної схеми (див. рис. 2). При переході від одної сіткової моделі до іншої вузлові температури визначалися шляхом проведення лінійної інтерполяції.

При розв'язку задачі міцності був прийнятий важкий бетон на гранітному заповнювачі класу С 30/35 і сталь з межею текучості  $f_y = 240$  МПа Після розв'язку міцнісної задачі були отримані результати у вигляді графіків зміни максимального прогину плити та швидкості його зростання із часом впливу «стандартної» пожежі.



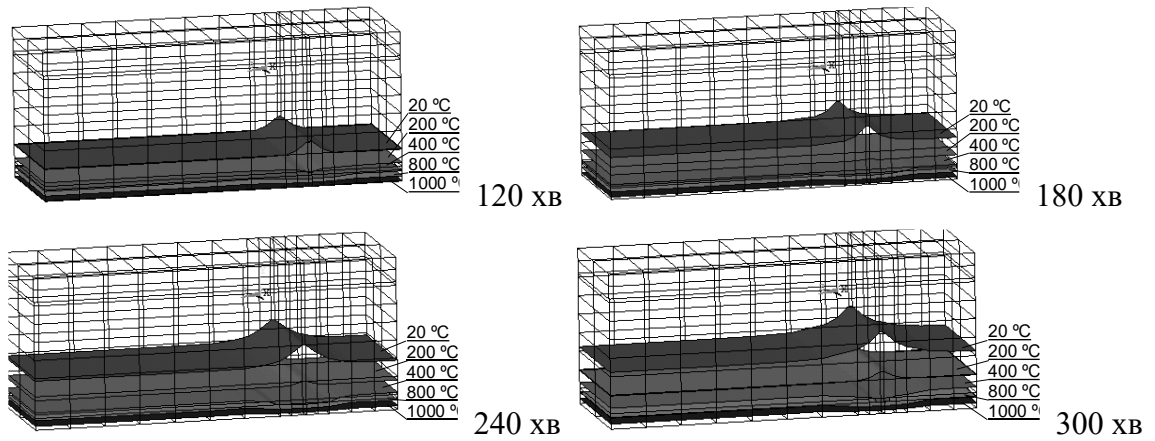


Рис. 3. Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у перерізі сталезалізобетонної плити у різні моменти часу

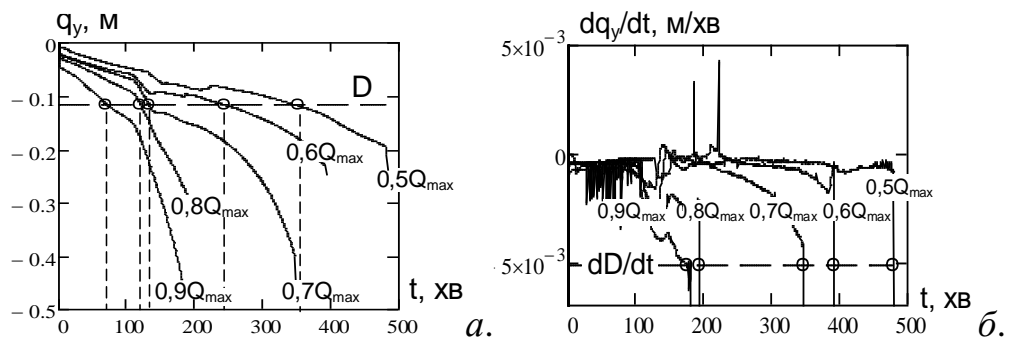


Рис. 4. Графіки найбільшого прогину плити (а) та швидкості його наростання (б) у залежності від часу її експонування в умовах пожежі із стандартним температурним режимом для різних умов навантаження.

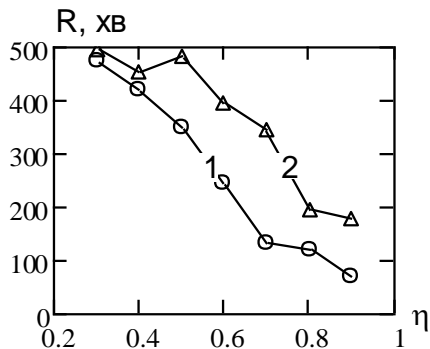


Рис. 5. Вогнестійкість сталезалізобетонної плити у залежності від рівня її навантаження: 1 – за критерієм критичного найбільшого прогину; 2 – за критерієм критичної швидкості наростання найбільшого прогину.

Важливою особливістю кривої прогину є наявність ділянки де прогин зменшується. Це свідчить про те, що унаслідок температурного розширення сталевий двотавр у часовий інтервал з 200 хв по 244 хв долає тиск навантаження і його середина має переміщення вгору. За даним щодо вогнестійкості сталезалізобетонної плити були побудовані її графіки у залежності від рівня навантаження, що наведені на рис. 5. Відповідно до отриманих даних можна побачити, що за критерієм критичного прогину межа вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності настає скоріше

У третьому розділі описані та проаналізовані методики експериментальних досліджень. Для відпрацювання процедур розроблених способів інтерполяції були проведені вогневі випробування двох зразків-близнюків сталезалізобетонної плити двох типів, які відрізняються між собою висотою сталевого внутрішнього елемента, в установці, схема та зовнішній вигляд якої показані на рис. 6.

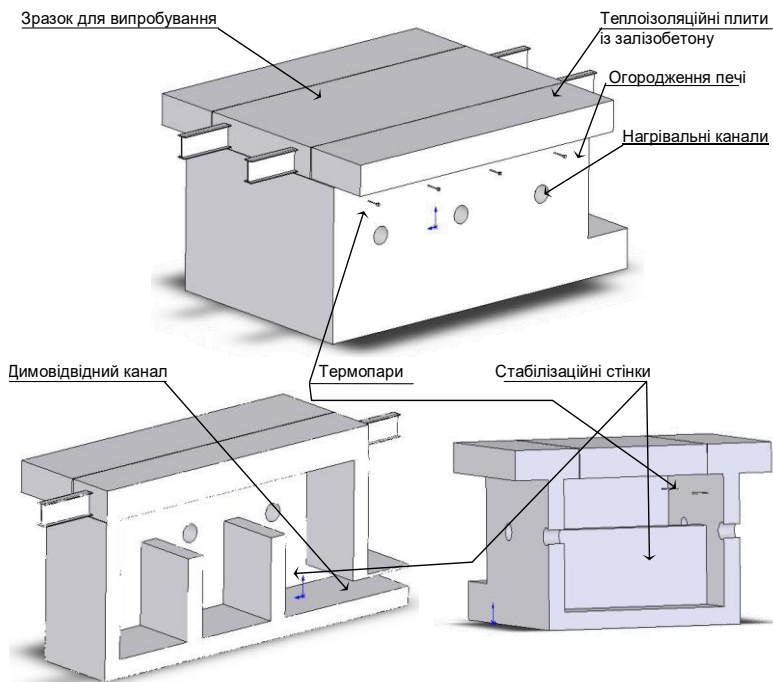
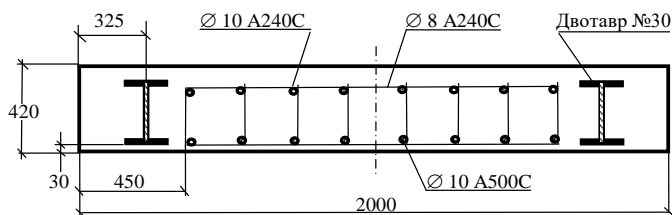
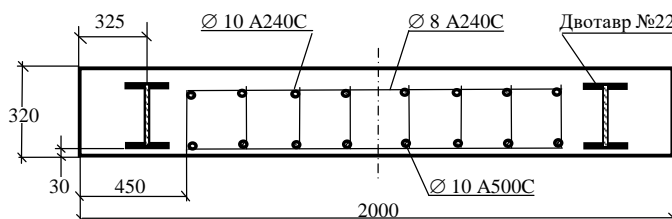


Рис. 6. Схема та зовнішній вигляд випробувальної установки для стандартних випробувань на вогнестійкість сталезалізобетонних плит.

Конструкція плити перекриття першого типу розмірами 4500 мм x 2000 мм x 420 мм, двох несучих плит перекриття сталевих двотаврових балок, балки розташовані на відстані 1350 мм (покрівельна частина зразка). Залізобетонна плита перекриття складається з бетону марки БСГ В30 Р4 F200 W6 М5 та арматури діаметрами 8 мм, 10 мм і 12 мм (див. рис. 3.7). Плита другого типу має товщину 320 мм, а всі інші параметри ті ж самі. На рис. 7. наведені схеми армування зразків сталезалізобетонних плит для випробування та розташування внутрішніх сталевих двотаврових балок.



а.



б.

Рис. 7. Геометричні параметри та схема армування перерізу сталезалізобетонної плити-зразку для випробування: а – зразок 1 типу; б – зразок 2 типу.

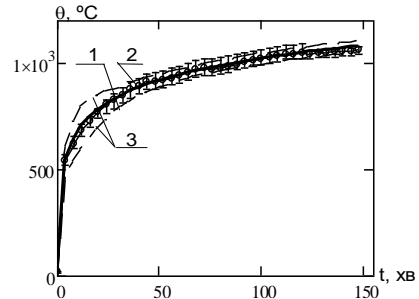
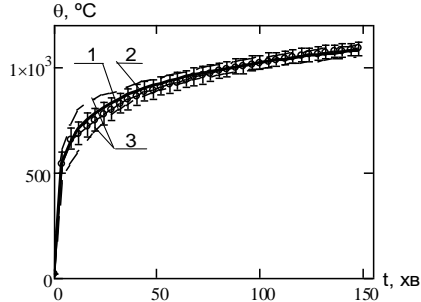
випробувального центру «Пожтест» с.м.т. Любарці Київської обл.

Розташування зразків у печі та розташування температурних датчиків відповідає вимогам стандартів ДСТУ Б В.1.1-13:2007 та ДСТУ Б В.1.1-4-98\*. Крім цього температурні датчики встановлювалися у серединному арматурному стержні та сталевому елементі. Контроль за паливно-форсунковою системою, показниками температурних датчиків та віддалемірів при визначенні прогину здійснювався із центрального пульта з використанням програмного забезпечення. Випробування проводилися у лабораторії

У четвертому розділі подані дані вогневих випробувань сталезалізобетонних плит, а також дослідження адекватності розрахункових даних при їх порівнянні із експериментальними даними.

На рис. 8 наведені показники температурних вимірювань у просторі вогневої печі.

Перше випробування плити 1 типу      Друге випробування плити 1 типу



Перше випробування плити 2 типу

Друге випробування плити 2 типу

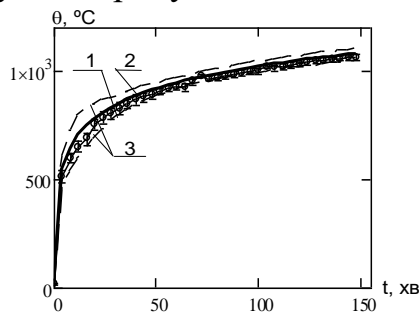
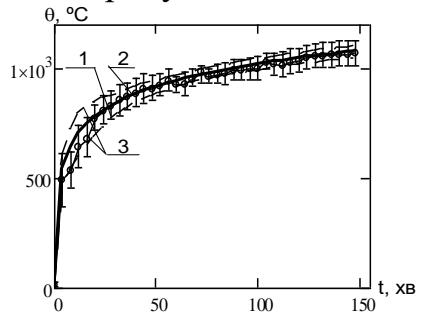


Рис. 8. Температурний режим випробувань в печі: 1 – середня температура в печі, 2 – стандартна температурна крива, 3 – допустимі відхилення температурного режиму.

На рис. 9 наведені графіки залежностей температури у різних контрольних точках необігрівної поверхні сталезалізобетонних плит, що були отримані за результатами проведених вимірювань при випробуваннях.

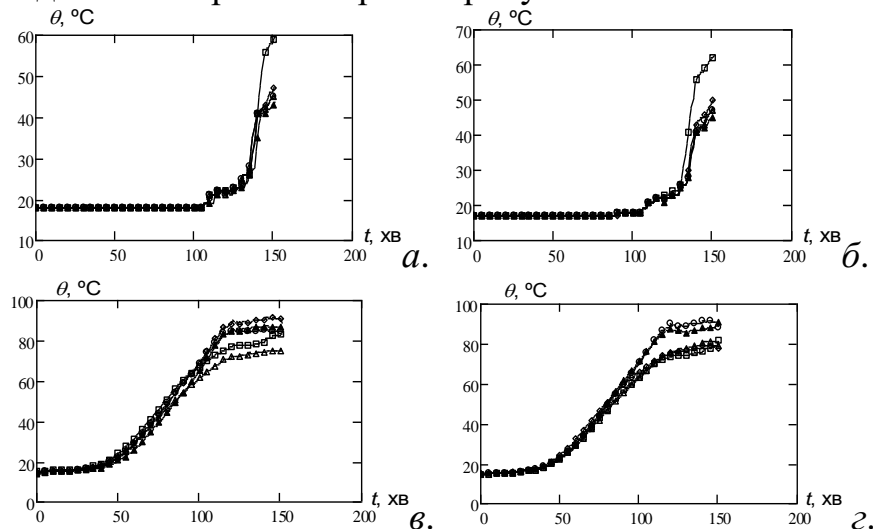


Рис. 9. Показники термодатчиків на необігрівній поверхні сталезалізобетонних плит першого типу зразків №1 (а) та №2 (б), сталезалізобетонних плит другого типу зразків №1 (в) та №2 (г): □□□ – показники 1 термодатчиків; ○○○ – показники 2 термодатчиків; △△△ – показники 3 термодатчиків; ●●● – показники 4 термодатчиків; ◆◆◆ – показники 5 термодатчиків.

На рис. 10 наведені графіки середніх значень найбільшого прогину досліджуваних сталезалізобетонних плит разом із відхиленнями.

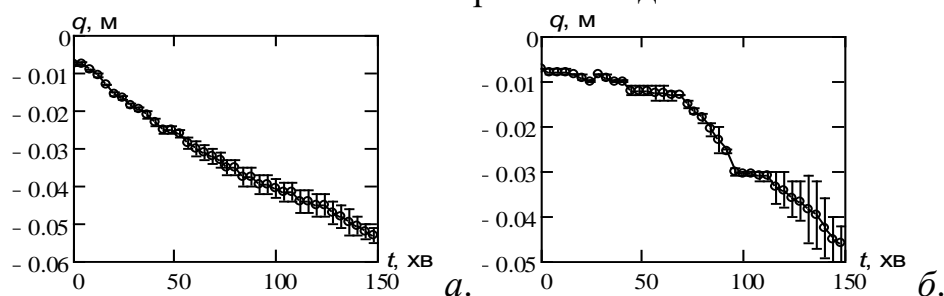


Рис. 10. Залежність середнього значення максимального прогину сталезалізобетонних плит із відхиленнями: а – зразків першого типу плити; б – зразків другого типу плити;

Результати розрахунку адекватності розрахункових даних для сталезалізобетонних плит наведені у табл. 2 та табл. 3.

Таблиця 2

**Статистичні параметри, отримані при дослідженні адекватності результатів розрахунку температури необігрівної сторони у сталезалізобетонних плитах**

Число ступенів вільності чисельника, $\nu_1$	Число ступенів вільності знаменника, $\nu_2$	Кількість експериментів, $d$	Кількість вимірювань в експерименті, $n$	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{сп}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. $F_{\text{табл}}$ .	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, $^{\circ}\text{C}$
Сталезалізобетонні плити першого типу									
2	304	2	153	0,63	0,598	0,949	1,01	13,8	15,3
Сталезалізобетонні плити другого типу									
2	304	2	153	1,01	0,958	0,954	1,01	11,5	14,5

Таблиця 3

**Статистичні параметри, отримані при дослідженні адекватності результатів розрахунку максимального прогину сталезалізобетонних плит**

Число ступенів вільності чисельника, $\nu_1$	Число ступенів вільності знаменника, $\nu_2$	Кількість експериментів, $d$	Кількість вимірювань в експерименті, $n$	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{сп}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. $F_{\text{табл}}$ .	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, мм
Сталезалізобетонні плити першого типу									
2	304	2	153	0,254	0,185	0,73	1,01	7,3	2,8
Сталезалізобетонні плити другого типу									
2	304	2	153	0,457	0,37	0,81	1,01	10,9	3,4

У результаті аналізу адекватності результатів розрахунку доведено, що розрахунок за запропонованими методиками дає достовірні результати.

У п'ятому розділі наведені дані щодо проведення повного факторного чисельного експерименту для створення математичної моделі залежності вогнестійкості від висоти двотавра плити, захисного шару та рівня навантаження. Математична модель за зробленим нами припущенням відповідає лінійній залежності межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності та факторами, яка має такий вигляд.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (1)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  – коефіцієнти регресії.

Для визначення коефіцієнтів регресії відповідно до формули (1) необхідно провести 8 чисельних експериментів за складеною для цього матриці планування, що записана у вигляді табл. 4.

Таблиця 4

**Типова матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі**

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Варіюючи параметри згідно із прийнятою методикою, і проводячи розрахунки за методикою розділу 2 даної роботи, були отримані межі вогнестійкості досліджуваних сталезалізобетонних плит. Отримані дані наведені у табл. 5.

Таблиця 5

**Межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити, отримані в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування**

Експериментальна ситуація	1	2	3	4	5	6	7	8
Межа вогнестійкості сталезалізобетонної плити для даної експериментальної ситуації, $y_i$ , хв	365	85	287	57	505	158	453	124

З отриманими даними були визначені коефіцієнти регресії, які наведені у табл. 6.

Таблиця 6

**Коефіцієнти регресії для математичної моделі залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонної плити від її конструктивних параметрів**

Коефіцієнт	$b_0$ ,	$b_1$ ,	$b_2$ ,	$b_3$ ,	$b_4$ ,	$b_5$ ,	$b_6$ ,	$b_7$
Значення	254.25	148.25	24	-55.75	8.5	-20.75	2.5	4

Використовуючи побудовану регресійну залежність, були побудовані відповідні поверхні залежності межі вогнестійкості від геометричних параметрів сталезалізобетонної плити для різного значення діючого навантаження, які наведені на рис. 11.

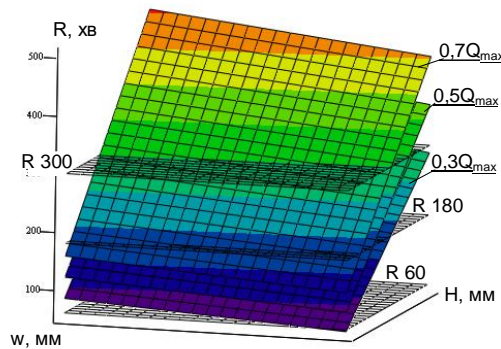


Рис. 11. Поверхні залежності межі вогнестійкості від геометричних параметрів сталезалізобетонної плити для різного значення діючого навантаження

Для аналізу впливу геометричних параметрів на межу вогнестійкості були побудовані взаємні залежності даних геометричних параметрів в умовах дії навантажень із різним рівнем. На рис. 12 наведені побудовані відповідні графіки.

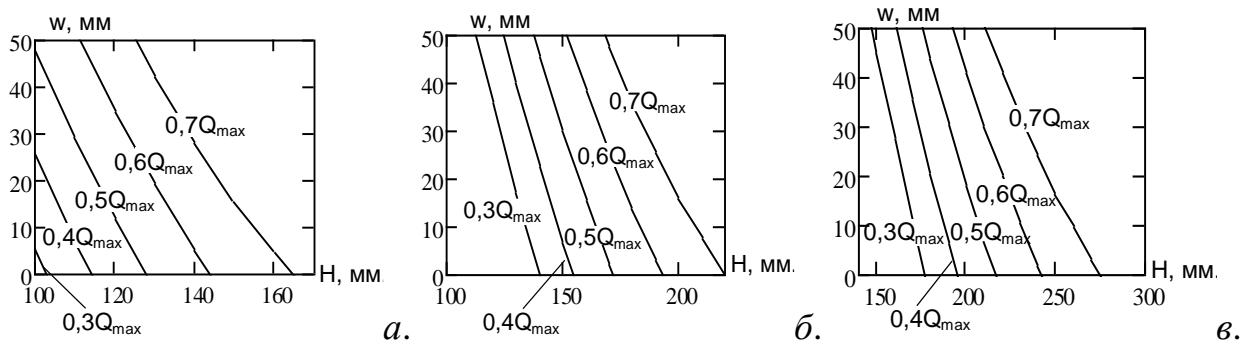


Рис. 12. Залежності захисного шару бетону від висоти двотаврового сталевго елемента сталезалізобетонної плити для забезпечення межі вогнестійкості: а – R 120; б - R 180; в - R 240

Адекватність результатів, отриманих за регресійною залежністю була перевірена за абсолютним та відносним відхиленням, що наведені у табл. 7.

Таблиця 7

**Адекватність результатів, визначених за регресійною залежністю для сталезалізобетонної плити другого типу з двотавром № 22**

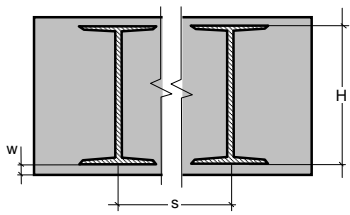
Межа вогнестійкості за МКЕ, хв	Межа вогнестійкості за регресійною залежністю, хв	Абсолютне відхилення, хв	Відносне відхилення, %
Рівень навантаження $0,3Q_{max}$			
238	254	16	6,3
Рівень навантаження $0,5Q_{max}$			
303	310	7	2,3
Рівень навантаження $0,7Q_{max}$			
188	198,5	10,5	5,3
Середнє значення			
-	-	11,2	4,6

Дані табл. 7 показують, що похибка результатів, отриманих за регресійною моделлю є незначною і дана регресійна залежність може бути використана для обґрунтування конструктивних параметрів сталезалізобетонних плит для забезпечення необхідного класу їх вогнестійкості

Використовуючи побудовані регресійні залежності, була створена таблиця мінімальних розмірів сталезалізобетонних плит для забезпечення необхідної вогнестійкості, яка відповідає табл. 8.

Таблиця 8

**Розміри сталезалізобетонних плит для забезпечення  
заданого класу вогнестійкості**

		Умови застосування Плита висота $h \geq 120\text{мм}$ товщина з.ш. $w \leq 10\text{мм}$ відстань між двотаврами $s \leq 2\text{м}$ площа додаткової арматури/загальна площа між полицями $A_s/(A_c+A_s) \leq 5\%$		Стандартні межі вогнестійкості				
				REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180
1	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,3$  Номер двотавра/товщина захисного шару (мм)	10/10	10/10	10/10 12/10 14/10	10/10 12/10 14/10	12/40 14/10 16/10		
	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,5$  Номер двотавра/товщина захисного шару (мм)	10/10	10/10	10/10 12/10 14/10	12/15 14/10 16/10	16/20 18/10 20/10		
	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,7$  Номер двотавра/товщина захисного шару (мм)	10/10	10/15 12/10	12/25 14/10 16/10	14/30 16/10 18/10	18/40 20/20 22/10		

Отримання даних, які наведені у табл. 8, можна прийти до висновку, що розроблений удосконалений табличний метод, що дозволяє ефективно визначити проектні дані сталезалізобетонних плит для забезпечення необхідного класу вогнестійкості. Дані табл. 8. визначені з врахуванням похибки 14 % при збільшенні мінімальних розмірів. Таким чином табличні дозволяють спроектувати сталезалізобетонні плити з гарантованим класом вогнестійкості

**ВИСНОВКИ:**

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуальної наукової задачі розкриття закономірностей залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних характеристик та діючого механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі як наукового підґрунтя удосконалення табличного методу оцінювання класу вогнестійкості зазначених будівельних конструкцій. При цьому одержано такі основні наукові та практичні результати :

- за результатами проведеного аналізу літературних джерел щодо сучасного стану забезпечення і методів оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит висунуто ідею що забезпечення нормованої вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками може бути досягнуто шляхом застосування удосконаленого розрахункового методу оцінювання класу їх вогнестійкості на підставі розроблених довідникових таблиць з переліком необхідних параметрів, визначених за результатами моделювання з використанням методу кінцевих елементів;
- розроблено методику і проведено математичне моделювання поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі;
- розроблено методику і проведено експериментальні дослідження поведінки сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками за впливу стандартного температурного режиму пожежі;
- проведено перевірку адекватності результатів математичного моделювання процесів деформації, руйнування з втратою вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень;
- враховані виявленої залежності межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками від їх геометричних параметрів, товщини захисного шару і механічного навантаження та побудована математичну модель, проведено повний факторний експеримент та створено довідникову таблицю для визначення класу їх вогнестійкості;
- розроблено удосконалений табличний метод оцінювання класу вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двотавровими сталевими балками.



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*У наукових фахових виданнях:*

1. Кропива М.О. Оцінка вогнестійкості залізобетонної колони експериментально-розрахунковим методом на основі її вогневих випробувань / С.В. Поздєєв, Кропива М.О., В.К. Словінський, А.М. Омельченко // Будівельні матеріали та конструкції Збірник наукових праць, Випуск № 142.-.2013 УкрДАЗТ. С.220-227.
2. Кропива М.О. Ідентифікація коефіцієнтів роботи бетону залізобетонної стіни за результатами її випробувань на вогнестійкість / С.Д. Щіпець, О.В. Некора, М.О. Кропива, А.М. Омельченко // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2014. – № 17. – С. 103 – 109.
3. Кропива М.О. Інтерполяція результатів вогневих випробувань залізобетонних балок для оцінки їхньої межі вогнестійкості / С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, А.М. Омельченко, С.Д. Щіпець // Науково-виробничий журнал Промислове будівництво та інженерні споруди. Випуск №2, 2014- Український інститут сталевих конструкцій імені В. Н. Шимановського. С.14-18.
4. Кропива М.О. Метод інтерпретації температурних полів у перерізі залізобетонних балок / С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, М.О. Кропива, А.М. Омельченко // Збірник наукових праць. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво. Випуск №2(44).-2015-ПолтНТУ С. 70-78.
5. Кропива М.А. Исследование поведения деревяных балок с огнебиозащитой при пожаре / С.В. Поздеев, Я.В. Горбаченко, О.В. Некора, М.А. Кропива // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – Минск: КИИ МЧС Республики Беларусь. – № 2(19). – 2015. – С. 38–47.
6. Кропива М.О. Дослідження поведінки сталезалізобетонної плити при пожежі за допомогою метода кінцевих елементів / М.О. Кропива// Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2015. – № 18. – С. 23 – 28.

*Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:*

[1] – здобувачем здійснено аналіз методів, щодо вимог нормативної бази, які висуваються до випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон, розроблений алгоритм визначення температурних вимірювань на основі теплотехнічного розрахунку; [2] – здобувачем розроблений алгоритм визначення температур за результатами розрахунку у перерізі стіни; [3] – здобувачем розроблена методика визначення температури у арматурних стержнях залізобетонної балки; [4] – здобувачем розроблена методика розрахунку напружено-деформованого стану у перерізі залізобетонної балки [5] – здобувачем розроблено методику розрахунку температур у перерізі дерев'яних балок, а також визначення коефіцієнтів зниження міцності основного матеріалу цих балок.

*Опубліковано в інших виданнях:*

1. Кропива М.О. Відновлення температурного поля у перерізі залізобетонної колони за даними вогневих випробувань / С.В. Поздєєв, В.К. Словінський, М.О. Кропива // Матеріали науково-практичної конференції Забезпечення пожежної та техногенної безпеки. - м. Харків. - 2013. – С.75-77.

2. Кропива М.О. Метод оцінки вогнестійкості залізобетонних балок експериментально-розрахунковим методом на основі їх вогневих випробувань / С.В. Поздєєв, А.В. Поздєєв, М.О. Кропива, А.М. Омельченко // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідація надзвичайних ситуацій. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції. м. Черкаси. - 2013. – С.222-224.

3. Кропива М.О. Оцінка вогнестійкості кам'яної несучої стіни / С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, М.О. Кропива, О.В. Бас // Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції. м. Черкаси. - 2014 – С. 166-169.

4. Кропива М.О. Дослідження обвуглювання вогнезахисних дерев'яних балок при вогневій дії під час пожежі/ О.В. Некора, Я.В. Горбаченко // Матеріали 16 всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників Технології захисту. - м. Київ. - 2014. – С.232-233

5. Кропива М.О. Залежність між значеннями межі вогнестійкості горизонтальних залізобетонних будівельних конструкцій і дисперсією температур на їх обігрівальних поверхнях / С.В. Поздєєв, С.О. Сідней, О.М. Нуянзін, М.О. Кропива // Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів(теорія і практика) Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції. - Харків 2015. – С.243-245

6. Кропива М.О. Вплив вимірювальних приладів на адекватність результатів випробування на вогнестійкість несучих стін / С.В. Поздєєв, С.О. Сідней, О.М. Нуянзін, М.О. Кропива // Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції. м. Черкаси. - 2015 – С.111-113.

*Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:*

[1] – здобувачем досліджено питання впливу експериментальних умов вогневих випробувань залізобетонних колон на результати оцінки їх вогнестійкості; [2] – здобувачем досліджено питання щодо інтерпретації температурних розподілень за результатами вимірювань під час вогневих випробувань залізобетонних балок без навантаження; [3] – здобувачем проведено оцінювання вогнестійкості кам'яних стін за результатами вогневих випробувань; [4] – здобувачем проаналізовано підходи щодо інтерполяції температур у вузлових точках за показниками термопар у контрольних точках дерев'яних балок; [5] – здобувачем були виконані розрахунки температурних полів у перерізі плити під впливом пожежі із стандартним температурним режимом; [6] – здобувачем були виконані розрахунки температурних полів у перерізі стіни під впливом пожежі із стандартним температурним режимом.

## АНОТАЦІЯ

**Кропива М.О. Удосконалення розрахункового методу оцінювання на вогнестійкість сталезалізобетонних плит із двотавровими сталевими балками – рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 - пожежна безпека. Черкаський інститут пожежної безпеки**

імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, 2016.

Роботу присвячено вирішенню актуальної науково-технічної задачі вдосконалення табличного розрахункового методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит із двотавровими сталевим балками шляхом визначення мінімальних розмірів даних плит для забезпечення стандартних класів вогнестійкості.

Розроблена методика уточненого розрахункового метода визначення фактичної межі вогнестійкості сталезалізобетонних плит із двотавровими сталевим балками усередині із використанням метода кінцевих елементів. За розробленою методикою виконанні розрахунки і визначені межі вогнестійкості для сталезалізобетонної плити в умовах навантаження із різним рівнем.

Розроблена методика вогневих випробувань на вогнестійкість сталезалізобетонних плит, куди входить обґрунтування технічних вимог до умов проведення випробувань і її метрологічного забезпечення. За розробленою методикою виконанні випробування, за результатами яких доведена адекватність отриманих розрахункових даних при їх порівнянні із експериментальними даними.

З використанням уточненого розрахункового метода побудована математична модель залежності межі вогнестійкості від геометричних параметрів та рівня навантаження плити. За отриманою моделлю створена довідникова таблиця для визначення класу вогнестійкості за параметрами досліджуваної сталезалізобетонної плити.

**Ключові слова:** клас вогнестійкості, сталезалізобетонна плита, табличний метод, метод кінцевих елементів, чисельний експеримент, повний факторний експеримент.

#### АННОТАЦІЯ

Кропива М.А. **Усовершенствование расчетного метода оценивания огнестойкости сталежелезобетонных плит с двотавровыми стальными балками** – рукопись. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 21.06.02 - пожарная безопасность. Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, Черкассы, 2016.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача усовершенствования табличного расчетного метода оценивания огнестойкости сталежелезобетонных плит с двотавровыми стальными балками путем определения минимальных размеров данных плит для обеспечения стандартных классов огнестойкости. Разработанная таким образом справочная таблица может использоваться как дополнение ко второй части Еврокода 4.

В результате анализа нормативной базы выявлено, что наиболее производительным, доступным и эффективным расчетным методом оценки огнестойкости сталежелезобетонных плит является табличный метод, однако для плит со стальными элементами стандартного профиля внутри них такие таблицы отсутствуют.

Усовершенствование метода испытаний на огнестойкость проведено на основе разработки его экспериментальной и математической базы, куда входит обоснование технических требований к условиям проведения эксперимента и его метрологического обеспечения, описание математического аппарата для интерполяции температурных полей, уточнение прочностных свойств основного материала стены, а также оценка достоверности и адекватности результатов, полученных с использованием данного метода.

Разработан алгоритм уточненного расчетного метода определения фактического предела огнестойкости сталежелезобетонных плит с двутавровыми стальными балками с использованием метода конечных элементов. По разработанной методике выполнены расчеты и определены пределы огнестойкости для сталежелезобетонной плиты в условиях нагрузки с разным уровнем.

Разработана методика испытаний на огнестойкость сталежелезобетонных плит, куда входит обоснование технических требований к условиям проведения испытаний и ее метрологического обеспечения. По разработанной методике выполнены испытания, по результатам которых доказана адекватность полученных расчетных данных при их сравнении с экспериментальными данными.

Проведен полный факторный численный эксперимент с использованием метода конечных элементов при варьировании высоты двутавра, его защитного слоя и уровня нагрузки.

Построена математическая модель зависимости предела огнестойкости от геометрических параметров и уровня нагрузки плиты. С использованием полученной модели создана справочная таблица для определения класса огнестойкости по параметрам исследуемой сталежелезобетонной плиты.

Показана адекватность результатов оценки огнестойкости при применении усовершенствованного метода.

**Ключевые слова:** класс огнестойкости, сталежелезобетонная плита, табличный метод, метод конечных элементов, численный эксперимент, полный факторный эксперимент.

#### ANNOTATION

Kropyva, M.O. **An improvement the method of calculation to fire resistance of composite steel and concrete slabs** - is a manuscript. Dissertation on the competition of scientific degree of candidate of engineering sciences on speciality 21.06.02 is fire safety. Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of National University of Civil Defense of Ukraine, 2016.

The work is devoted to solving actual scientific and technical problem of improving table calculation method for assessing the fire resistance of composite steel and concrete slabs with steel I-beam element inside by determining the minimum size of these plates for standard fire resistance classes.

A technique refined calculation method for determining the actual fire resistance of composite steel and concrete slabs with steel I-beam element inside using the finite element method. According to the method of calculation made and defined the limits of fire resistance for a composite slab load conditions with different levels.

A test procedure for fire resistance of composite slabs, which includes the study of technical requirements to the conditions of the test and its metrological assurance. According to the developed technique to perform the test, the results of which proved the adequacy of the calculated data when compared with the experimental data.

Using the adjusted calculation method according to a mathematical model of fire resistance limit of the geometric parameters and the level of the load plate. According to the resulting model created lookup table to determine the fire resistance class of the parameters studied a composite plate.

**Keywords:** fire resistance class, a composite steel and concrete slab, tabular method, finite element method, numerical simulation, a full factorial experiment.