

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

ЩІПЕЦЬ СТАНІСЛАВ ДМИТРОВИЧ

УДК 624.012

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТА КАМ'ЯНИХ НЕСУЧИХ СТІН**

Спеціальність 21.06.02 – пожежна безпека

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2015

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, начальник кафедри будівельних конструкцій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Ковалишин Василь Васильович, професор кафедри промислової безпеки та охорони праці Львівського Державного університету безпеки життєдіяльності кандидат технічних наук, доцент Шналь Тарас Миколайович, доцент кафедри будівельних конструкцій та мостів інституту будівництва та інженерії доквілля Національного університету «Львівська політехніка».

Захист відбудеться «__» червня 2015 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради *K 35.874.01* в Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79000, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79000, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

Автореферат розісланий «__» _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент

В. М. Баланюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Статистичні дані свідчать, що протягом останнього року в Україні внаслідок руйнування залізобетонних та кам'яних стін при пожежі було знищено або пошкоджено в понад 27 тис. будівель.

Згідно із нормативною базою України фактичні межі вогнестійкості несучих стін визначаються на підставі проведення випробувань, які мають відтворювати тепловий і силовий вплив пожежі на натурний зразок стіни і тому вважаються найбільш достовірними. Забезпечення таких умов пов'язано з технічними труднощами, які зумовлені тим, що в більшості існуючих установок випробувальних лабораторій максимальний тиск в навантажувальних вузлах набагато менший за встановлені проектні навантаження. У той же час системою діючих стандартів не надається науково обґрунтованих методик щодо оцінки вогнестійкості несучих стін, випробуваних таким чином, що призводить до істотних помилок. Уникнення таких помилок може бути досягнуто проведенням вогневих випробувань у даних умовах із подальшою математичною інтерпретацією результатів вимірювань шляхом розв'язку статичної задачі з використанням закономірностей температурних розподілів та міцнісних характеристик матеріалу у перерізах стін. При цьому впровадження такого підходу дозволить не тільки суттєво зменшити трудомісткість і вартість вогневих випробувань, а й уникнути суттєвих затрат на модернізацію та доукомплектування випробувальних установок у діючих лабораторіях України.

Розкриття закономірностей розподілів температурних та міцнісних характеристик у матеріалі несучих стін під впливом пожежі є актуальною технічною задачею, результати розв'язку якої є науковим підґрунтям удосконалення методу випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до Концепції Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012 – 2015 роки; Концепції наукового забезпечення діяльності МНС України (2012 р.), у рамках виконання в Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля науково-дослідної роботи «Прогнозування технічного стану будівельних конструкцій при дії силових, деформаційних та високотемпературних впливів» (номер державної реєстрації 0113U004019), у якій здобувач був виконавцем.

Ідея роботи полягає в удосконаленні методу випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін шляхом спрощення умов експериментальної частини проведення випробувань за дії механічних навантажень менших за передбачені відомими методиками або взагалі без їх прикладання.

Мета й задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розкриття закономірностей температурних розподілів та міцнісних характеристик матеріалу у перерізах залізобетонних та кам'яних несучих стін при впливі на них стандартного температурного режиму пожежі як підґрунтя удосконалення методу їх випробувань на вогнестійкість.

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

- провести аналіз сучасного стану щодо нормування вогнестійкості несучих стін та методів визначення класів їх вогнестійкості;
- виявити закономірності температурних розподілів та міцнісних характеристик матеріалу у перерізах стін при впливі на них стандартного температурного режиму пожежі;
- на основі виявлених закономірностей температурних розподілів і механічних властивостей матеріалів стін обґрунтувати математичний апарат та розробити методику для інтерполяції температурних розподілів і визначення механічних властивостей внутрішніх шарів основного матеріалу стіни, а також дослідити адекватність результатів, отриманих за даною методикою;
- розробити методику проведення вогневих випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін на вогнестійкість в умовах прикладання механічних навантажень, набагато менших за діючі, або без їх прикладання відповідно до способу інтерполяції температурних розподілів та подальшої розрахункової обробки отриманих результатів вимірювань, проведених під час випробувань;
- провести вогневі випробування залізобетонних та кам'яних несучих стін, провести оцінку їх вогнестійкості за розробленими методиками і дослідити точність та достовірність отриманих результатів;
- розробити удосконалений метод випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін на вогнестійкість і обґрунтувати вимоги щодо проведення експериментальних та розрахункових процедур для досягнення його найбільшої ефективності, а також створити відповідне програмне забезпечення для реалізації розробленого метода.

Об'єкт дослідження – процес визначення вогнестійкості залізобетонних та кам'яних несучих стін.

Предмет дослідження – вплив закономірностей температурних розподілів та механічних властивостей матеріалу стін на ефективність процесу визначення їх вогнестійкості.

Методи дослідження. Для дослідження залізобетонних та кам'яних несучих стін застосовувався експериментальний метод вогневих випробувань. Для встановлення основних закономірностей для температурних розподілів та параметрів напружено-деформованого стану у перерізах несучих стін використаний метод математичного моделювання. Для розробки методики розрахункової інтерпретації результатів експериментів застосовані стандартні методи розрахунку меж вогнестійкості несучих стін. Для вивчення достовірності та адекватності результатів експериментів і моделювання теплових процесів в перерізі елементів при тепловій дії пожежі застосовані методи математичної статистики.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розкритті закономірностей температурних розподілів і міцнісних характеристик матеріалу у перерізах залізобетонних та кам'яних несучих стін при впливі на них стандартного температурного режиму пожежі. При цьому:

- уперше виявлено, що залежності температури від координати у перерізах стін із кладки з керамічної, силікатної цегли, блоків із легкого бетону та залізобетонних стін в умовах випробувань за стандартним температурним режимом пожежі мають параболічний характер, і виявлено закономірності змінення їх показника степеня із тривалістю експонування;
- уперше визначені коефіцієнти регресії показника степеня рівняння, що описує температурні розподіли під впливом пожежі у перерізах стін із кладки з керамічної, силікатної цегли, із блоків із легкого бетону та залізобетонних стін у діапазоні значень їх товщини;
- удосконалено математичний апарат для ідентифікації залежностей коефіцієнту зниження міцності основного матеріалу залізобетонних та кам'яних несучих стін від його температури прогріву;
- отримало подальший розвиток застосування обчислювальних методик для визначення реальних розподілів температури та міцності в основному матеріалі несучих стін при їх випробуваннях на вогнестійкість.

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 загальновизнаних 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 13 %, 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 методу оцінки вогнестійкості залізобетонних та кам'яних стін шляхом проведення вогневих випробувань, розрахованого на застосування випробувальних установок, наявних діючих лабораторіях України, в яких максимальне зусилля, що можливо прикласти, є набагато меншими за навантаження за розрахунковими схемами будівель. У результаті сформульованих технічних вимог для досягнення найбільшої ефективності даного методу, на основі розробленого способу інтерполяції температур та ідентифікації коефіцієнтів міцнісних властивостей бетону і кам'яної кладки за даними вимірювань під час вогневих випробувань удосконалений метод дозволяє оцінити клас вогнестійкості із більшою точністю та достовірністю у порівнянні із методиками, що застосовуються у даний час. Це дозволяє уникнути матеріальних затрат на модернізацію та доукомплектування діючих установок випробувальних лабораторій України, а також використовувати його при розробці

відповідної нормативної документації для визначення меж вогнестійкості несучих стін.

Розроблені методики впроваджені у технологічний процес Випробувального центру «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 і їх поведінка в умовах пожежі і надзвичайних ситуацій».

Особистий внесок здобувача. полягає у аналізі літературних джерел, підготовці та проведенні випробувань, обробці отриманих даних, розробці способів інтерполяції температур у вузлових точках перерізу несучих стін та ідентифікації коефіцієнтів роботи її основного матеріалу за результатами вогневих випробувань, розробці способів визначення межі вогнестійкості несучої стіни за математичною моделлю її 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.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Дни науки. Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации» (Росія м. Єкатеринбург, 2014 р.);
- VI Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2014р.);

Публікації. Основний зміст роботи викладено в 6 наукових статтях, із них 5 опубліковано у виданнях, внесених до переліку ВАК України, 1 стаття опублікована у закордонному науковому журналі, а також у тезах 5 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 119 найменувань; містить 160 сторінки друкованого тексту, 30 таблиць, 93 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

несучих стін та виявлено шляхи підвищення ефективності метода їх вогневих випробувань.

У роботах відомих вчених Яковлева О.І., Мілованова О.Ф., Ройтмана В.М., Бушева В.П., Страхова В.Л., Фоміна С.Л., Круковського П.Г., Харченка І.О., Новака С.В., Поздєєва С.В., Т. Lie, В. Bartelemi, G. Kruppa, Т. Harmathy та ін. показано, що для оцінки вогнестійкості несучих стін використовуються два основних підходи. Перший підхід заснований на проведенні вогневих випробувань, які відбуваються з використанням зразків, розміри і діючі навантаження яких відповідають або близькі до реальних. Цей підхід є більш переважним, оскільки дозволяє враховувати тип конкретного матеріалу, геометричну конфігурацію перерізу і діючі навантаження даної конструкції. У багатьох випадках умови, які реалізуються при проведенні випробувань не мають чіткої відповідності діючим умовам в реальних конструкціях, це стосується випадків коли опорно-навантажувальний вузол не здатен прикласти до зразка відповідне до розрахункової схеми навантаження. При цьому випробовують зразки, до яких прикладаються навантаження набагато менші. Результати випробувань цих зразків поширюються на реальні конструкції без відповідного обґрунтування і не враховується ймовірна похибка як результат таких умов проведення випробувань.

Для оцінки вогнестійкості залізобетонних і кам'яних несучих стін є перспективним використання підходу, який полягає у поєднанні вогневих випробувань і розрахункової інтерпретації їх результатів на основі однієї з відомих математичних моделей напружено-деформованого стану відповідного елемента конструкції. Застосування такого підходу дозволить суттєво підвищити ефективність наявної лабораторно-випробувальної бази в Україні і уникнути масштабних затрат на їх модернізацію.

У **другому розділі** описаний розроблений нами спосіб інтерполяції для визначення температур у вузлових точках дискретизованого перерізу за показниками термодатчиків у контрольних точках, де вимірюється температура у внутрішніх шарах стіни під час випробувань. На рис. 1 показані температурні розподілення по перерізу стіни за нормаллю до її поверхонь.

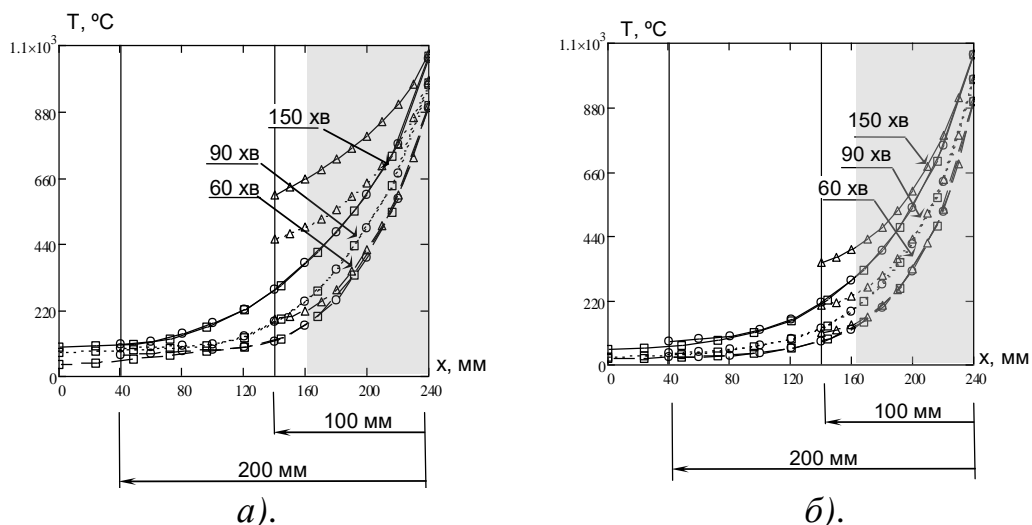


Рис. 1. Графіки температури прогріву внутрішніх шарів стін з керамічної цегли (а), із залізобетону (б) для різних моментів часу: $\square\square\square$ – стіна товщиною 240 мм; $\circ\circ\circ$ – стіна товщиною 200 мм; $\triangle\triangle\triangle$ – стіна товщиною 100 мм.

Аналіз графіків на рис. 1 дозволяє припустити, що можливо провести апроксимацію температурного розподілу за трьома контрольними точками в яких розташовані термомари. Дані графіки показують, що їх можна умовно розділити на дві ділянки із різними сталими значеннями першої похідної температури у залежності від просторової координати. Ділянка з більшим значенням похідної виділена сірим кольором. В цій точці пропонується розташовувати контрольну точку для вимірювання температури.

Температурні розподілення пропонується апроксимувати за виразом, що має такий загальний вигляд:

$$T_{k,i} = T_{0k} + (T_{\max k} - T_{0k}) \left[\frac{i}{n} \right]^{Q_k}, \quad (1)$$

де $T_{k,i}$ – температура i -тої точки перерізу стіни у k -тий момент часу; T_{0k} , $T_{\max k}$ – температура першої та останньої точок у k -тий момент часу; n – кількість інтервалів між контрольними точками; Q_k – показник степеня параболи у k -тий момент часу

Для апроксимації температурного розподілу був застосований однопараметричний функціонал. Змінним параметром у даному випадку є ступеневий показник Q_k , який визначається шляхом мінімізації квадратичної нев'язності. Це дає змогу визначити залежності цього показника від часу і товщини стіни. Такі залежності були отримані для стін товщиною, що відповідає ряду стандартних значень 70, 90, 100, 140, 170, 190, 200, 240, 300, 360 мм. Аналіз вказаних залежностей показує, що їх можна апроксимувати і описати функцією з трьома змінним параметрами a , b , c типу:

$$Q_k = a \exp(b \cdot [k_{\max} - k] + c). \quad (2)$$

Розподілення температур у стіновому елементі, підданому стандартним вогневим випробуванням визначається за значеннями температури, які отримані шляхом прямих вимірювань протягом часу випробувань, при використанні такої формули:

$$T_{k,i} = T_{w2k} + (T_{w1k} - T_{w2k}) \chi^{a_h \exp(b_h \cdot (k_{\max} - k) + c_h)}, \quad (3)$$

де T_{w1k} , T_{w2k} – відповідно температури обігрівної та необігрівної поверхонь стіни, підданій випробуванням, у k -тий момент часу; a_h , b_h , c_h – коефіцієнти регресії, відповідні певній товщині для стіни із даного матеріалу; k , k_{\max} – поточний та максимальний дискретний час випробування, що визначаються через інтервал 1 хв.

На рис 2 показані графіки коефіцієнтів регресії для виразу (3), що визначалися за допомогою алгоритму Левенберга-Марквардта. При використанні формули (3) для інтерполяції температур по перерізу стіни певної товщини та певного матеріалу значення коефіцієнтів регресії вибирається з розроблених таблиць. Проміжкові значення можна визначати за допомогою лінійної інтерполяції.

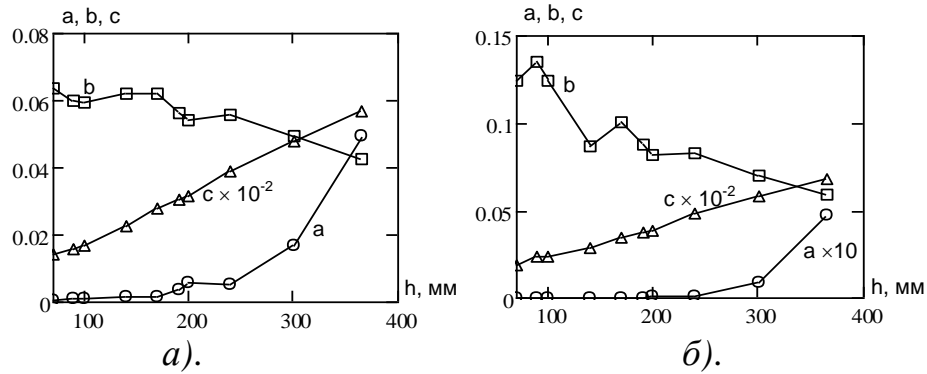


Рис. 2. Графіки залежностей коефіцієнтів апроксимуючої функції (3) від товщини стіни: з керамічної цегли (а), залізобетону (б), із різною товщиною.

Аналіз адекватності отриманих температурних розподілів у порівнянні із теоретичними розрахунками, які були використані як вихідні для побудовання регресійних залежностей, показав, що запропонований спосіб інтерполяції температури у перерізі несучих стін при їх вогневих випробуваннях дозволяє отримувати адекватні дані, оскільки у всіх випадках F-критерій адекватності має істотно нижчі значення за табличні. Похибка при цьому складає не більше за 4% і у середньому становить 2,8 %. Середньоквадратичне відхилення даних апроксимації від усереднених даних за всіма вибірками складає не більше 13 °С. Це означає, що запропонований метод апроксимації є достатньо точним.

Третій розділ присвячений описанню та аналізу методик експериментальних досліджень. Для відпрацювання процедур розроблених способів інтерполяції були проведені вогневі випробування двох зразків-близнюків фрагментів залізобетонної стіни та двох зразків-близнюків фрагментів стіни із блоків з легкого бетону в установці, схема та зовнішній вигляд якої показані на рис. 3.

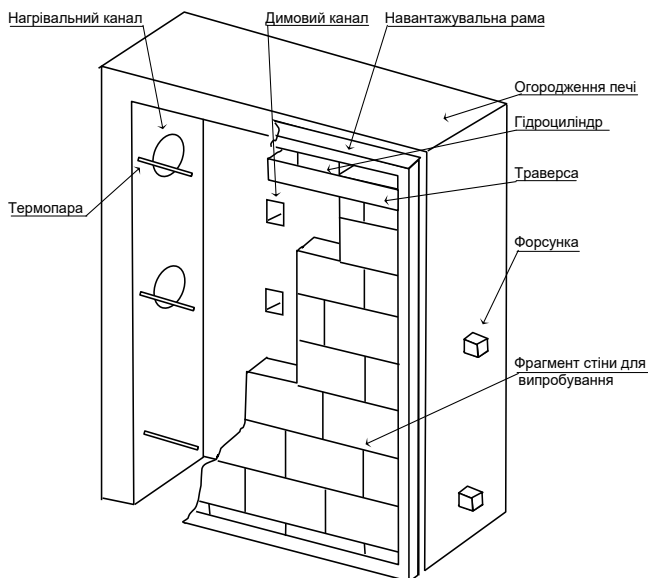


Рис. 3. Схема та зовнішній вигляд випробувальної установки для стандартних випробувань на вогнестійкість несучих стін.

Для зменшення обсягу необхідної експериментальної роботи було прийнято рішення послідовно випробувати два зразки-близнюки фрагменту залізобетонної стіни. Два зразки фрагменту стіни з кам'яної кладки із легкого бетону

випробувалися одночасно. В обох випадках до зразку прикладався тиск з боку навантажувальної рами на установці рівний 15 т/м^2 .

Перший тип зразків для випробування являє собою фрагменти залізобетонної стіни, що має розміри $3200 \times 3000 \times 200 \text{ мм}$. Відповідно до технічної документації на дану залізобетону стіну, вона має бути виготовлена з бетону С 30/35 (В30), робоча арматура діаметром 16 мм класом А500С. Другий тип зразків – це стінові фрагменти з блоків із легкого бетону LC 8/9 (В8) розмірами $3200 \times 1500 \times 190 \text{ мм}$. На рис. 4 наведені геометрія перерізу, схема розташування арматури та схема розташування термопар.

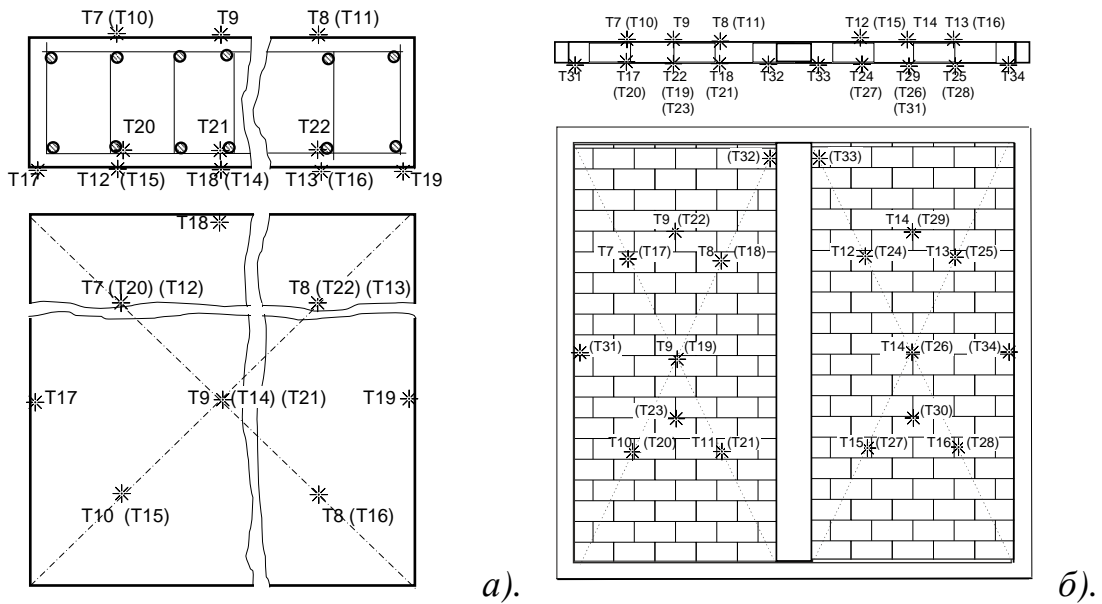


Рис. 4. Геометрія перерізу та схема розташування термопар залізобетонного стінового фрагменту-зразка (а) та стінового фрагменту зразка з блоків із легкого бетону (б).

На рис. 5 показаний зовнішній вигляд установки готової для випробувань.



а).



б).

Рис. 5. Вигляд стінового фрагменту-зразку із залізобетону (а) та стінових фрагментів-зразків з блоків із легкого бетону (б).

У четвертому розділі подані дані вогневих випробувань стінових фрагментів, результати проведеної інтерполяції, а також дослідження їх адекватності.

На рис. 6 показані результати температурних вимірювань на поверхнях стінових фрагментах, підданих випробуванням.

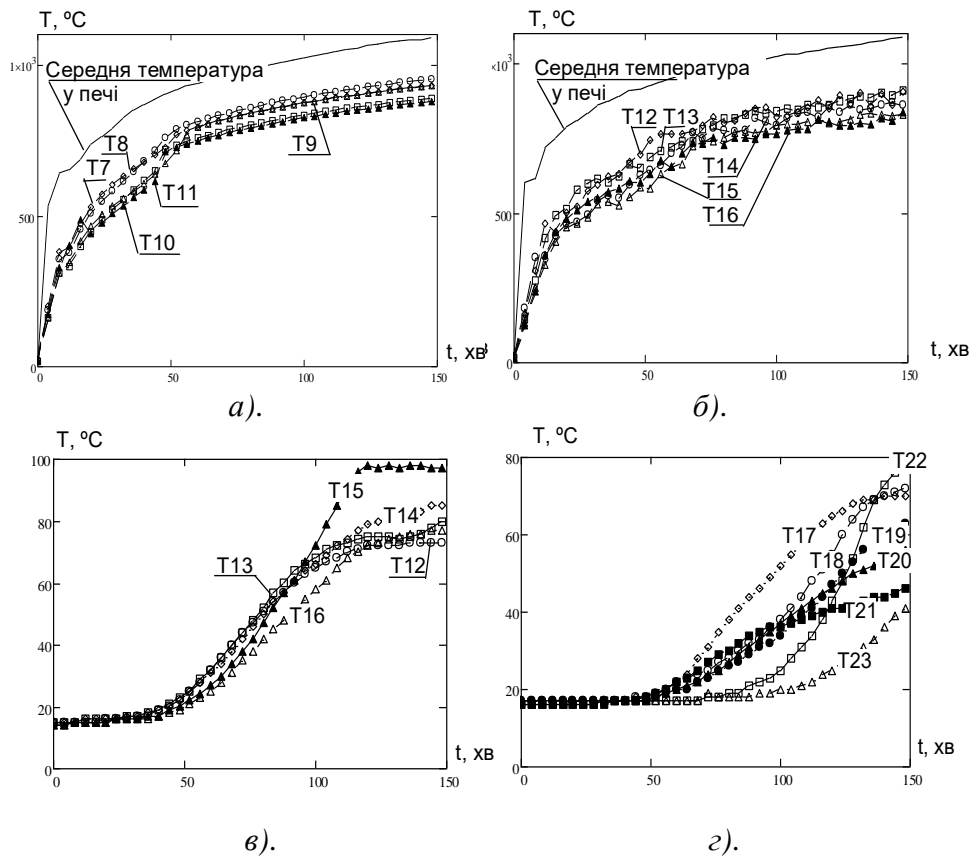


Рис. 6. Показники термопар на обігрівних поверхнях залізобетонного стінового фрагменту-зразку (а) та стінового фрагменту-зразку з блоків з легкого бетону (б), на необігрівних поверхнях залізобетонного стінового фрагменту-зразку (в) та стінового фрагменту-зразку з блоків з легкого бетону (г).

На рис. 7 подані результати вимірювань вертикальних переміщень несучих стін під час випробувань.

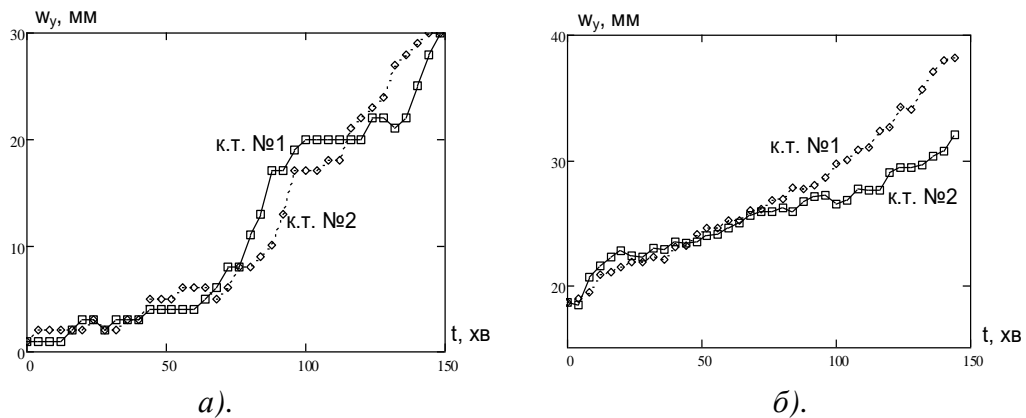


Рис. 7. Залежності вертикальних переміщень у контрольних точках (к.т.) залізобетонного стінового фрагменту (а) та стінового фрагменту з блоків із залізобетону (б) від часу випробувань.

За результатами випробувань, за формулою (3) була проведена інтерполяція температурних розподілень у перерізі стінових фрагментів, які були піддані вогневим випробуванням. На рис. 8 подані розподілення температур, що отримані за допомогою інтерполяції.

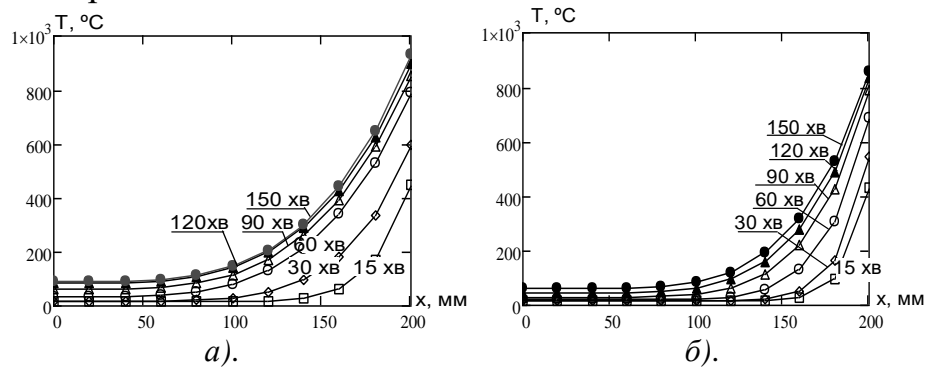


Рис. 8. Температурні розподілення у перерізі стінового фрагменту з залізобетону (а) та стінового фрагменту з блоків із легкого бетону (б), отримані за допомогою розробленого методу інтерполяції.

Для аналізу адекватності результатів інтерполяції були порівняні відхилення температур у контрольних точках внутрішніх шарів стінових фрагментів від отриманих у результаті інтерполяції. У результаті досліджень показано, що отримані результати є адекватними, оскільки у всіх випадках F-критерій адекватності має істотно нижчі значення за табличні. Найбільша похибка при цьому складає не більше за 13% і у середньому становить 6,8 %. Середньоквадратичне відхилення даних апроксимації від усереднених даних за всіма вибірками складає не більше 7 °С.

У **п'ятому розділі** наведені дані щодо розробки методики ідентифікації коефіцієнту зниження міцності бетону та матеріалу кам'яної кладки за результатами вимірювань під час випробувань та міцнісного розрахунку з використанням температурних розподілів та створення на його основі програмного забезпечення. На рис. 9 подана блок-схема удосконаленого методу випробувань на вогнестійкість несучих стін.

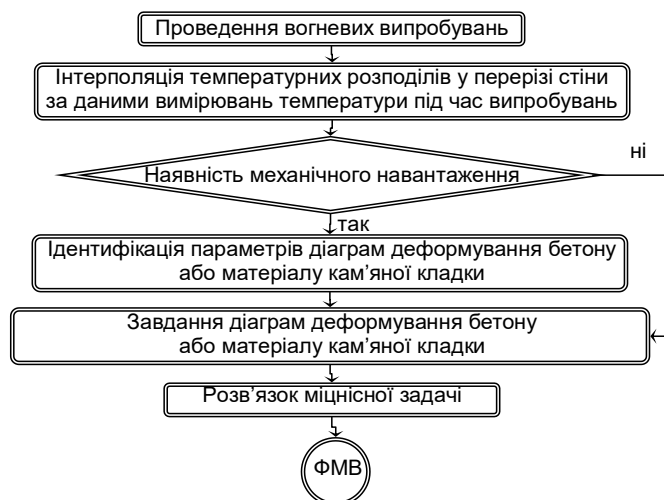


Рис. 9. Схема здійснення оцінки вогнестійкості за допомогою інтерпретації результатів вогневих випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін.

При визначенні температурних розподілів шляхом інтерполяції необхідно вирішити міцнісну задачу. У випадку, який є найбільш властивим для випробувальних лабораторій України, коли випробування на вогнестійкість несучих стін відбувається із навантаженням, значно меншим за діюче, можна вирішувати задачу міцності після того, як на основі отриманих даних щодо деформацій зразку у ході випробування будуть уточнені механічні властивості залізобетону або матеріалу кам'яної кладки. Для залізобетону механічні властивості можна уточнювати тільки для бетону, оскільки властивості сталі більш жорстко відтворюються при її виготовленні.

Схема визначення коефіцієнту роботи матеріалів стін подана на рис. 10.

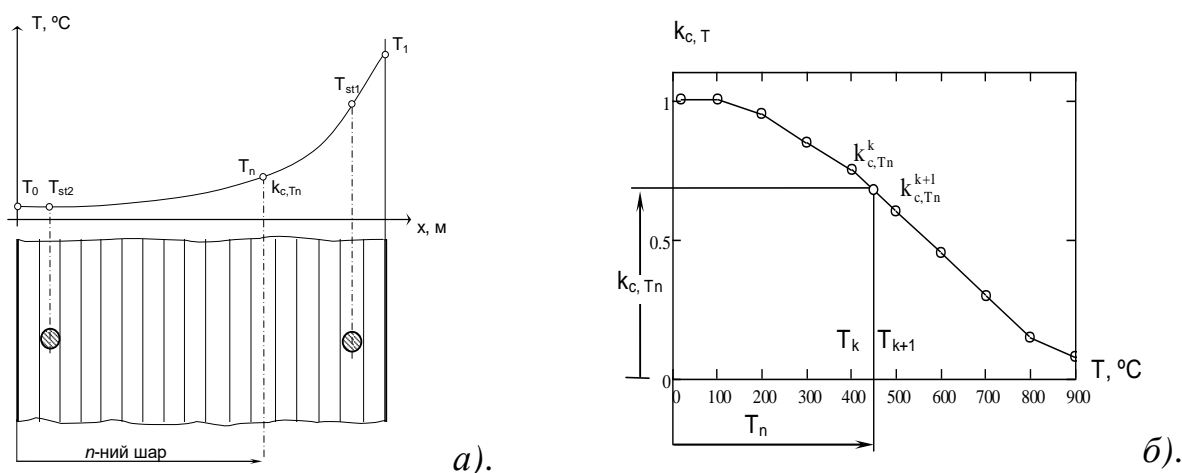


Рис. 10. Схеми визначення коефіцієнту роботи матеріалу стіни за температурою у внутрішньому шарі: *а* – схема розбиття на шари перерізу стіни; *б* – схема інтерполяції за табличними даними.

Згідно з цією схемою необхідно записати систему рівнянь рівноваги у вигляді системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР).

$$[\mathbf{F}]\{\mathbf{k}\} + \{\mathbf{S}\} = 0, \quad (4)$$

де $\{\mathbf{k}\} = (k_{c1} \ k_{c2} \ \dots \ k_{cm})^T$ – вектор табличних значень коефіцієнту роботи матеріалу стіни відповідні табличним температурам $\{\mathbf{T}_m\} = (0 \ 100 \ 200 \ \dots \ T_m)^T$, що виступають у якості невідомих; $[\mathbf{F}]$ – матриця, яка записується у вигляді:

$$[\mathbf{F}] = \begin{pmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & & Z_{ij} & & Z_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mj} & \dots & Z_{mm} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де члени матриці визначаються за формулами:

$$Z_{i1} = \sum_n [1 - 0.01(T_{ni} - T_1)] F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right), \quad Z_{im} = \sum_n 0.01(T_{ni} - T_{m-1}) F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right) \quad (6)$$

$$Z_{ij} = \sum_n [1 - 0.01(T_{ni} - T_j)] F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right) + \sum_n 0.01(T_{ni} - T_{j-1}) F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right).$$

Величина $m = \lceil T_{\max} \cdot 0.01 \rceil$ визначається максимальною температурою нагрівання стіни під час випробувань; w_x – поперечний прогин стіни під час випробувань; $\{S\}$ – вектор зусиль у арматурних стержнях, який визначається за виразом:

$$\{S\} = (S_1 \dots S_i \dots S_m)^T, \quad (7)$$

де $S_i = F_{st1}(\varepsilon, T_{st1}) + F_{st2}(\varepsilon, T_{st2})$. Функції діаграми деформування бетону $F_n(\varepsilon, T_{ni})$ та зусилля у арматурі в i -тий момент часу визначаються за виразами наведеними у стандартах щодо розрахунку залізобетонних та кам'яних конструкцій.

Деформація при обчисленні компонентів системи рівнянь (4) визначається за виразом:

$$\varepsilon_{n,i} = \xi_i + \chi_i \cdot x_n - \varepsilon_{Tn}, \quad (8)$$

де ξ_i, χ_i – поздовжнє видовження та кривизна вісі стіни у i -тий момент часу; ε_{Tn} – температурна деформація, що визначається за таблицями у стандартах; x_n – координата n -го внутрішнього шару перерізу стіни, що вимірюється від серединної точки перерізу.

Поздовжнє видовження та кривизна вісі стіни пов'язані з її переміщеннями, які вимірюються під час випробувань за виразами.

$$\xi = 1 - h^{-1} \int_0^{h+w_y} \sqrt{1 + \left(\frac{w_x \pi}{h + w_y}\right)^2 \cos^2\left(\frac{x \cdot w_x \pi}{h + w_y}\right)} dx, \quad \chi = \pi^2 w_x (h + w_y)^{-2}. \quad (9)$$

де w_y – поздовжнє переміщення верхнього краю стіни під час випробувань

Використовуючи формули (4) – (9) та результати вимірювань під час випробувань була проведена ідентифікація коефіцієнтів зниження бетону залізобетонних стінових фрагментів і кладки стінових фрагментів з блоків із легкого бетону. На рис. 11 подані її результати.

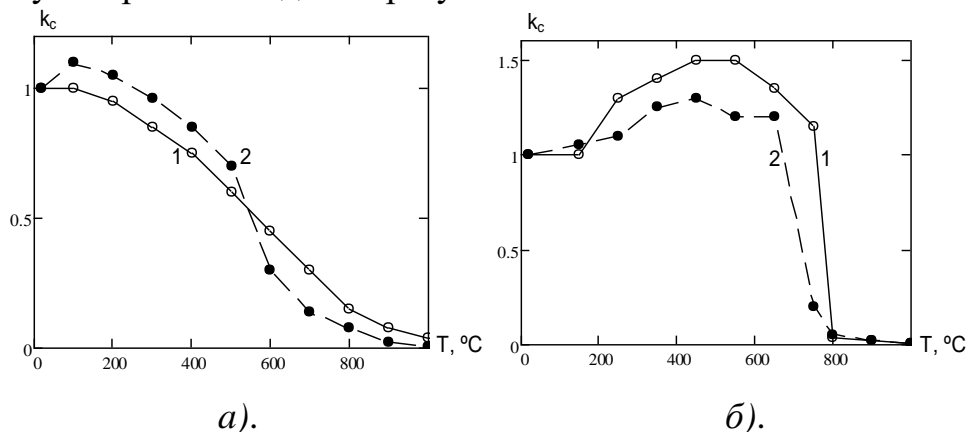


Рис. 11. Залежності коефіцієнту зниження міцності бетону (а) та кладки із блоків з легкого бетону (б): 1 – стандартна залежність, 2 – уточнена залежність.

Для розрахунку використаний підхід, що полягає у поступовому збільшенні кривизни стіни у кожний контрольний момент часу випробування із одночасним визначенням поздовжньої сили на кожному кроці збільшення деформації. При досягненні критичного значення переміщення $C = h/100$ розрахунок припиняється. Із отриманих значень сили вибирається найбільше, яке і буде вважатися несучою здатністю випробуваної стіни.

Для описання термомеханічних властивостей бетону та кам'яної кладки були застосовані стандартні діаграми, які рекомендовані EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 і EN 1996-1-2:2004 Eurocode 6 та уточнені діаграми. Вигляд діаграм, побудованих за уточненими коефіцієнтами зниження міцності поданий на рис. 12.

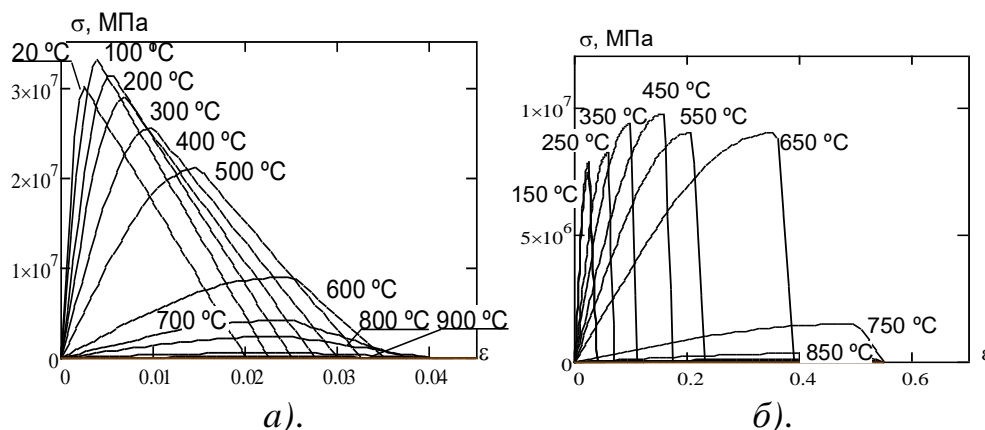


Рис. 12. Діаграми деформування бетону (а) та кам'яної кладки з легкого бетону (б) стінових фрагментів-зразків.

На рис. 13 показані результати розрахунку у вигляді графіків залежностей несучої здатності від часу випробувань, отриманих при використанні температурних вимірювань під час випробувань та стандартних і уточнених діаграм деформування, а також діаграм деформування арматурної сталі згідно з EN 1992-1-2:2004 Eurocode.

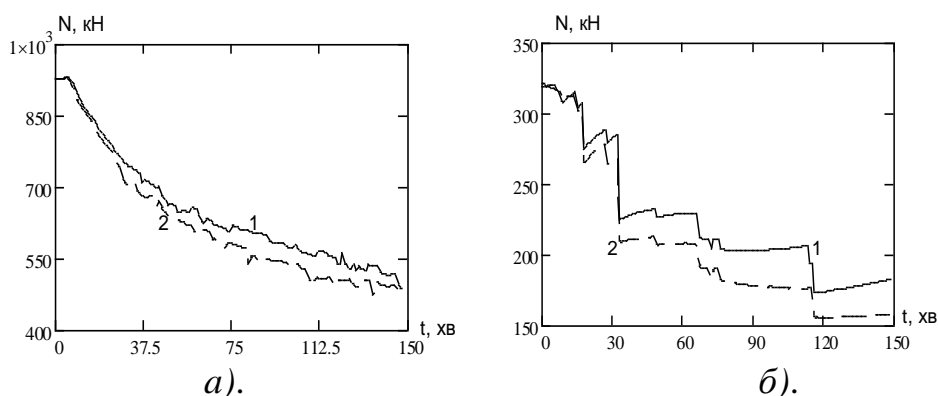


Рис. 13. Залежності несучої здатності від часу випробувань залізобетонної (а) та кам'яної стіни з легкого бетону (б): 1 – отримана на основі стандартних діаграм деформування матеріалу стіни; 2 – отримана на основі уточнених діаграм деформування матеріалу стіни.

Графіки на рис. 13 показують, що уточнені характеристики сильно впливають на кінцевий результат, оскільки максимальне відхилення для залізобетонної стіни

складає 76 кН (майже 8 т), а середнє відносне відхилення складає 18 %. Так само для кам'яної стіни з легкого бетону максимальне відхилення для залізобетонної стіни складає 41 кН (майже 4 т), а середнє відносне відхилення складає 17 %.

Для порівняння результатів оцінки межі вогнестійкості за несучою здатністю з використанням стандартних та уточнених діаграм деформування матеріалу стіни були розглянуті випадки, коли діюче навантаження на стіну відповідає значенню приведеної зосередженої сили 500 кН для залізобетонної стіни і 200 кН для кам'яної стіни.

У результаті розрахунку для залізобетонної стіни відхилення межі вогнестійкості складало 27 хв (22 %), а для кам'яної стіни з легкого бетону складало 33 хв (42 %). Це означає, що уточнення діаграм деформування матеріалу стіни має приводити до суттєвого уточнення оцінки межі вогнестійкості

Для оцінки чутливості результатів оцінки вогнестійкості несучих стін за удосконаленим методом до експериментальної похибки був використаний метод збурення, який полягає у «збуренні» вихідних параметрів на величину імовірної похибки і порівнянні отриманого результату із результатом отриманим для вихідних даних без «збурення». На рис. 14 показані надані «збурення».

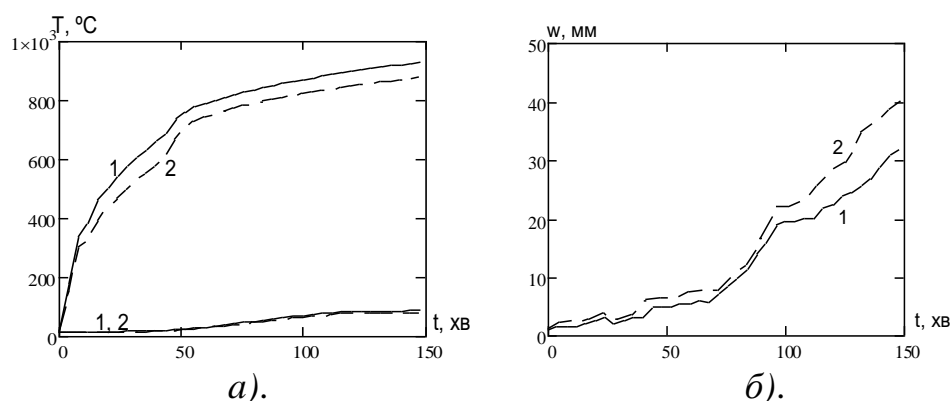


Рис. 14. Температурні режими нагріву обігрівної сторін залізобетонної стіни (а) та її вертикальні переміщення (б): 1 – значення, отримане експериментально, 2 – значення із збуренням.

На рис. 15 подані результати розрахунку несучої здатності для вимірних та «збурених» показників випробувань.

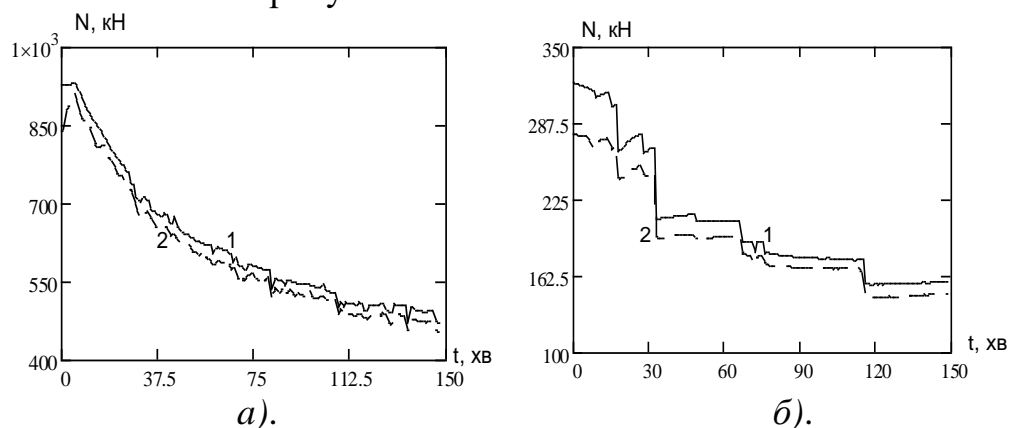


Рис. 15. Залежності несучої здатності від часу випробувань залізобетонної (а) та кам'яної стіни з легкого бетону (б): 1 –отримана на основі вимірних показників; 2 – отримана на основі показників із «збуренням».

Результати визначення межі вогнестійкості несучих стін з врахуванням чутливості результатів оцінки вогнестійкості за удосконаленим методом подані у табл. 1.

Таблиця 1

Результати визначення межі вогнестійкості

Стінові фрагменти-зразки для випробування	Межа вогнестійкості		Відхилення	
	експер., хв	розрах., хв	Абс. хв	Відн., %
Залізобетонний стіновий фрагмент	119	112	7	5,9
Стіновий фрагмент з блоків із легкого бетону	116	114	2	1,7

Отримані дані показують те, що їх похибка складає не більше 6 %. Таке значення похибки показує високу ефективність удосконаленого методу. Проведені дослідження дали змогу розробити програмне забезпечення, для визначення межі за результатами проведених вогневих випробувань

ВИСНОВКИ:

В дисертаційній роботі наведені результати розв'язання актуальної наукової задачі розкриття закономірностей температурних розподілів та міцнісних характеристик матеріалу у перерізах залізобетонних та кам'яних несучих стін при впливі на них стандартного температурного режиму пожежі як підґрунтя удосконалення методу їх випробувань на вогнестійкість шляхом обґрунтування умов проведення експерименту при дії механічних навантажень, набагато менших за діючі, для підвищення ефективності цих випробувань за рахунок зменшення ресурсомісткості та вартості їх проведення. При цьому одержані такі основні результати.

1. Проведений аналіз сучасного стану щодо нормування вогнестійкості та методів визначення фактичних меж вогнестійкості несучих залізобетонних та кам'яних стін експериментальним шляхом, у результаті чого виявлено, що існуючий метод вогневих випробувань має суттєвий недолік, що полягає у неможливості у повній мірі відтворити умови навантаження стін у реальних конструкціях, оскільки прикладання навантажень з такою величиною пов'язано із істотними технічними складнощами. При цьому нормативна база щодо випробувань несучих стін на вогнестійкість не забороняє проведення випробувань з прикладанням механічного навантаження, набагато меншого за діюче, або взагалі без їх прикладання, проте немає науково обґрунтованих методик щодо проведення даних випробувань у таких умовах.

2. Розвинений математичний апарат інтерполяції температурних полів за вимірюваннями температури у контрольних точках, заснований на представленні інтерполяційної функції у вигляді параболічної залежності із степенем, показник якого залежить від часу експонування стіни при вогневій дії в умовах випробувань на вогнестійкість.

3. Виявлені залежності показника степеня інтерполяційної параболічної функції від часу випробувань, що може бути представлена експоненціальною регресійною залежністю.

4. Визначені коефіцієнти регресії показника степеня інтерполяційної функції для несучих стін різних матеріалів та із різною товщиною, що може бути використана для визначення температурних розподілень у перерізі цих стін під час їх випробувань на вогнестійкість.

5. Обґрунтована методика проведення вогневих випробувань шляхом створення найбільш ефективної схеми розташування термопар на поверхнях та у перерізі несучих стін для здійснення інтерполяції за запропонованою методикою.

6. Доведена адекватність результатів інтерполяції температурних розподілень по перерізу стін за критерієм Фішера, який не перевищив табличного значення, при цьому похибка результатів інтерполяції у порівнянні з теоретичними та експериментальними даними не перевищила 13 %.

7. Удосконалений математичний апарат уточнення коефіцієнтів зниження міцності основного матеріалу несучих стін у залежності від температури його нагріву за результатами вимірювань деформацій під час їх випробувань на вогнестійкість, у результаті чого можливе більш точне визначення межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої спроможності за запропонованим методом у середньому на 30 %.

8. Обґрунтований метод визначення межі вогнестійкості на основі розв'язку міцнісної задачі за температурними даними випробувань несучих стін на вогнестійкість, заснований на деформаційній моделі, який дає точні результати, оскільки обчислені із застосуванням цього методу межі вогнестійкості мали похибку не більше 6%, що дало змогу розробити відповідне програмне забезпечення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У наукових фахових виданнях:

1. Щіпець С.Д. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань / С.В. Поздєєв, В.К. Словінський, С.Д. Щіпець // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2013. – № 14. – С. 88 – 93.

2. Щіпець С.Д. Визначення температурних полів у перерізі залізобетонної колони при її випробуванні на вогнестійкість / С.В. Поздєєв, В.К. Словінський, С.Д. Щіпець, А.М. Омельченко // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2013. – № 15. – С. 130 – 137.

3. Щіпець С.Д. 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, 2013. – № 17. – С. 103 – 109.

4. Щіпец С.Д. Метод интерпретации данных огневых испытаний железобетонных колонн для расчетной оценки их огнестойкости / С.В. Поздеев,

В.К. Словинский, С.Д. Щіпець, А.Н. Омельченко // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – Минск: КИИ МЧС Республики Беларусь. – № 1(19). – 2014. – С. 38–47.

5. Щіпець С.Д. Інтерпретація результатів вогневих випробувань залізобетонних балок для оцінки їхньої межі вогнестійкості / С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, А.М. Омельченко, С.Д. Щіпець // Промислове будівництво та інженерні споруди. Науково-виробничий журнал. – Київ, 2014. – №2. – С.14-19.

6. Щіпець С.Д. Метод визначення температурних полів у перерізах несучих стін за результатами їх випробувань на вогнестійкість // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. –К.: НДІЦЗ, 2014. – № 1 (29). – С.79 – 84.

Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:

[1] – здобувачем здійснено аналіз методів, щодо вимог нормативної бази, які висуваються до прикінцевої обробки результатів випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон, розроблений алгоритм інтерпретації температурних вимірювань; [2] –здобувачем розроблений третій спосіб інтерполяції температур за результатами температурних вимірювань у контрольних точках перерізу; [3] – здобувачем розроблена методика розташування термопар при проведенні вогневих випробувань залізобетонної колони; [4] – здобувачем розроблена методика розташування термопар у перерізі залізобетонної балки [5] – здобувачем розроблено методику інтерполяції температур у перерізі стін, а також ідентифікації коефіцієнтів зниження міцності основного матеріалу несучих стін.

Опубліковано в інших виданнях:

1. Щіпець С.Д. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних стін на основі їх вогневих випробувань / С.В. Поздєєв, С.Д. Щіпець, В.К. Словінський, О.В. Некора // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Черкаси: АПБ, 2013. – С. 224–226.

2. Щіпець С.Д. Відновлення температурного поля у перерізі залізобетонного ригеля за даними вогневих випробувань / С.В. Поздєєв, С.Д. Щіпець, А.М. Омельченко // Забезпечення пожежної та техногенної безпеки : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників – Х.: НУЦЗУ, 2013. – С. 75–77.

3. Щіпець С.Д. Перевірка адекватності результатів визначення меж вогнестійкості стінових елементів експериментально-розрахунковим методом / С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, С.Д. Щіпець, І.В. Федченко // матеріали 16 Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників – Київ : ДСНС, 2013. – С. 233–235.

4. Щіпець С.Д. Метод интерпретации результатов огневых испытаний железобетонных балок для оценки огнестойкости / С.В. Поздеев, С.Д. Щіпець, А.М. Бондар, И.Р. Василенко // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации. Материалы Дней Науки (апрель 2014). – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2014. - С. 75–77.

5. Щіпець С.Д. Застосування програмного забезпечення ANSYS для оцінки вогнестійкості кам'яних несучих стін // Надзвичайні ситуації: безпека та

захист : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. – Черкаси: АПБ, 2014. – С. 364–367.

Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:

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

АНОТАЦІЯ

Щіпець С.Д. **Удосконалення методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних та кам'яних несучих стін** – 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, 2014.

Роботу присвячено вирішенню актуальної науково-технічної задачі вдосконалення методу вогневих випробувань залізобетонних та кам'яних несучих стін на вогнестійкість шляхом обґрунтування умов проведення експерименту при дії механічних навантажень, набагато менших за діючі, або без їх прикладання і розрахункової інтерпретації його результатів на основі математичних моделей напружено-деформованого стану залізобетону та кам'яної кладки в умовах нагріву.

Розроблений спосіб визначення температурних полів за вимірюваннями температури у контрольних точках на поверхнях стінового фрагменту під час його випробувань шляхом інтерполяції. Для розробленого способу виявлені закономірності зміни показника ступеня інтерполяційного поліному у залежності від часу випробування і визначені регресійні коефіцієнти для стін різної товщини та із різних матеріалів.

Розроблена методика вогневих випробувань на вогнестійкість залізобетонних та кам'яних несучих стін при дії механічних навантажень, набагато менших за діючі, або без їх прикладання, куди входить обґрунтування технічних вимог до умов проведення випробувань і її метрологічного забезпечення, опис математичного апарату для інтерполяції температурних полів у перерізі, уточнення міцнісних властивостей основного матеріалу стіни, а також оцінка достовірності та адекватності результатів, отриманих за даним методом.

Показано, що удосконалений метод дозволяє істотно знизити вартість і трудовитрати при проведенні випробувань на вогнестійкість залізобетонних та кам'яних несучих стін.

Ключові слова: клас вогнестійкості, несуча стіна, вогневі випробування, інтерполяція температур, розрахункова інтерпретація, міцнісна задача, деформаційна модель.

АННОТАЦІЯ

Щипец С.Д. **Усовершенствование метода испытаний на огнестойкость железобетонных и каменных несущих стен** – 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, 2014.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача усовершенствования метода испытаний на огнестойкость железобетонных и каменных несущих стен путем обоснования упрощенных условий, связанных с приложением нагрузок, намного меньших, чем действующие, или с их отсутствием. В результате этого уменьшается ресурсоемкость и стоимость проведения данных испытаний, а также избегаются затраты на модернизацию испытательных установок действующих лабораторий.

В результате анализа нормативной базы выявлено, что современные нормативные документы, действующие в Украине, которые регламентируют условия испытаний несущих стен на огнестойкость, не запрещают их проведение с приложением нагрузок, намного меньших, чем действующие, или с их отсутствием, однако, они не содержат научно обоснованных процедур и условий проведения испытаний в таких условиях.

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 способ определения температурных полей по измерениям температуры в контрольных точках на поверхностях стенового фрагмента во время его испытаний путем интерполяции. Для разработанного способа выявлены закономерности изменения показателя степени интерполяционного полинома в зависимости от времени испытания и определены регрессионные коэффициенты для стен разной толщины и разных материалов.

Обоснована методика проведения огневых испытаний путем создания наиболее эффективной схемы расположения термопар в сечении стеновых фрагментов.

Обоснован математический аппарат для уточнения прочностных свойств основного материала стены.

Разработан способ последующей математической интерпретации полученных температурных данных и деформаций на основе решения прочностной задачи с использованием деформационной модели.

Показана адекватность результатов оценки огнестойкости при применении усовершенствованного метода.

Ключевые слова: класс огнестойкости, несущая стена, огневые испытания, интерполяция температур, расчетная интерпретация, прочностная задача, деформационная модель.

ANNOTATION

Shchipets S.D. **An improvement of a test method on fire resistance of bearing reinforced-concrete and masonry walls** - 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, 2014.

In dissertational work the actual scientific and technical problem of improvement of a test method on fire resistance of reinforced-concrete and masonry walls by a substantiation of the simplified conditions connected with the appendix of loadings, much more smaller than operating, or with their absence is solved. As a result of it decreases cost of carrying out of the given trials, and also expenses for modernisation of testing plants of operating laboratories are avoided.

Test method improvement on fire resistance is spent on the basis of working out of its experimental and mathematical base where the substantiation of specifications to conditions of carrying out of experiment and its metrological maintenance, the description of mathematical apparatus for interpolation of temperature fields, specification of a mechanical properties of a parent material of a wall, and also an estimation of reliability and adequacy of the results received with use of the given method enters.

The way of definition of temperature fields on temperature measurements in check points on surfaces walls a fragment during its trials by interpolation is developed. For a developed way laws of change of an exponent interpolating a polynom depending on time of trial are revealed and are certain regress factors for walls of a different thickness and different materials.

The way of the subsequent mathematical interpretation of the received temperature data and deformations on the basis of the decision mechanical problems with use of deformation model is developed.

Keywords: limit of fire-resistance, reinforce-concrete and masonry bearing walls, fire tests, interpolation of temperatures, calculation interpretation, mechanical task, deformation model.