

УДК 614.841.415

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.89.98>

*Аліна ПЕРЕГІН (ORCID ID:0000-0003-2062-5537),
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ СТІНИ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВОГНЕВИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Метою даної роботи є розробка удосконаленої методики оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі вимірювань температури у контрольних точках, відповідно до проведеного вогневого випробування в малогабаритній установці без механічного навантаження та врахуванні його під час розрахунків.

У даній роботі розроблено алгоритм проведення розрахунку оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі отриманих експериментальних даних за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження, що лягає в основу загальної методики. Було удосконалено методику інтерпретації даних температури прогріву несучої залізобетонної стіни, нагрівання фрагментів якої здійснювалось у малогабаритній вогневій печі за стандартним температурним режимом пожежі без навантаження, відповідно отримані дані можуть бути частиною експериментально-розрахункового методу оцінки межі вогнестійкості. За рахунок розробки більш раціональної схеми місць розташування датчиків контролю температури (термопар), які є достатніми для проведення інтерполяції даних.

Визначено розподіли температур у перерізах несучих залізобетонних стін. Встановлено, що при зміні довжини виробу та розподіленого навантаження, яке запроєктоване при роботі конструкції в будівлі, можливо визначити межу вогнестійкості для несучих залізобетонних стін інших габаритів та з іншим робочим навантаженням.

***Ключові слова:** оцінка межі вогнестійкості, несуча залізобетонна стіна, температура, вогневі випробування, вогнева піч.*

***Постановка проблеми.** Забезпечення безпеки будівель, захисту людей, та майна в разі пожежі є надважливою задачею, для її виконання необхідно забезпечувати відповідну межу вогнестійкості несучих залізобетонних стін, які є досить стійкими до вогню, однак при тривалому впливі високих температур може відбутися зменшення міцності та стійкості конструкції, що може призвести до пошкодження або руйнування стін. Тому необхідно визначати межу вогнестійкості, тобто температуру, при якій стіни починають втрачати свої властивості та можуть призвести до руйнації всієї будівлі, щоб запобігти цьому.*

Для оцінки межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін можуть використовуватися різні методи та способи, включаючи як чисельне моделювання так і експериментальні дослідження. Проте, виникає проблема в тому, що результати різних методів оцінки межі вогнестійкості можуть давати різні результати, а отже необхідно визначити найбільш точний та надійний метод оцінки межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін.

***Аналіз останніх досягнень і публікацій.** У попередніх дослідженнях теплового впливу пожежі на несучі залізобетонні стіни у малогабаритній вогневій установці, під дією власної ваги, було отримано результати прогріву досліджуваного фрагменту, в необхідних місцях контролю температур, для подальшого розрахунку [1]. Відповідно*

до отриманих даних, можливо провести оцінку вогнестійкості досліджуваного фрагменту несучої залізобетонної стіни за несучою здатністю, розрахунковим шляхом.

На рис. 1 відображено схему впливу стандартного температурного режиму пожежі на елемент несучої залізобетонної стіни з однієї сторони.

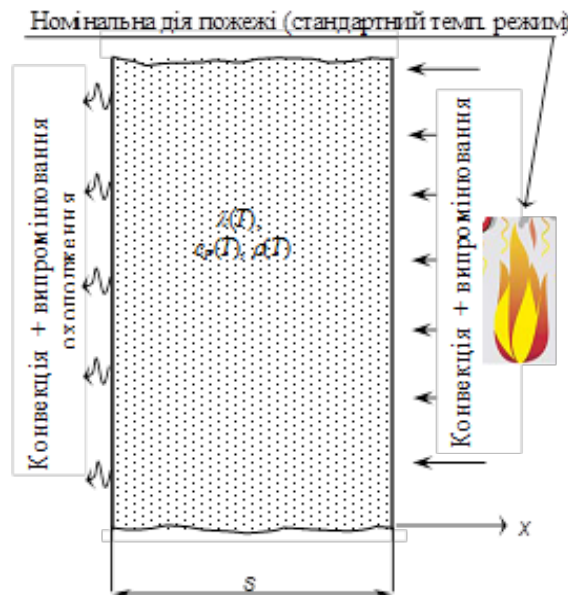


Рисунок 1. Розрахункова схема моделі теплопередачі під час нагріву стінового елемента при вогневих випробуваннях

Дана методика, проведення випробування в малогабаритній вогневій установці без механічного навантаження, в розрізі вимог, запропонованих у стандартах [2, 3], полягає у впливі стандартного температурного режиму пожежі на елемент несучої залізобетонної стіни з однієї сторони та отриманні експериментальних даних, на основі яких, при застосуванні розрахунку на міцність, буде можливо оцінити межу вогнестійкості несучої залізобетонної стіни за несучою здатністю (рис. 1).

Аналізуючи попередні роботи [4-5], стало відомо, що у даних дослідженнях було використано методи розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. Відповідно дослідження показали, що метод дозволяє отримати точні результати та забезпечує можливість проведення різноманітних аналізів та експериментів з урахуванням різних умов та факторів.

Постановка задачі та її розв'язання. Для вирішення поставленої мети, а саме: розробка удосконаленої методики оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі вимірювань температури у контрольних точках, відповідно до проведеного вогневого випробування в малогабаритній установці без механічного навантаження та врахуванні його під час розрахунків, було зазначено ряд задач:

- створити алгоритм оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни за результатами вогневих випробувань під дією власної ваги, що лягає в основу загальної методики;

- розробити удосконалену методику інтерпретації даних температури прогріву всередині несучої залізобетонної стіни;

- запропонувати більш раціональне розташування датчиків контролю температури та описати дану удосконалену схему;

- провести розрахунок межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі отриманих результатів вогневих випробувань, які описані в роботі [1].

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Експериментально-розрахункова методика дозволяє проводити випробування стінових елементів будівельних конструкцій на вогнестійкість за температурним режимом згідно з [3] під дією власної ваги, а реальне навантаження враховується на етапі розрахунку, вхідними даними для яких є отримані експериментальні [1].

Загальна методика використовується для встановлення межі вогнестійкості елементів будівельних конструкцій, зокрема стіни, та які піддаються впливу теплового потоку при односторонньому обігріві.

Даний метод в залежності від температури нагріву враховує зміни механічних властивостей кожного шару бетону й арматурної сталі. Зміна механічних властивостей враховується при розгляді параметрів напружено-деформованого стану в перерізі несучої залізобетонної стіни відповідно до схеми її закріплення, геометричних параметрів, арматурної сталі та класу міцності бетону. Рівняння, які описують напружено-деформований стан, використані відповідно до рекомендацій [6].

Для того, щоб врахувати зміни механічних властивостей у залежності від температури використано інтерполяцію температур у вузлових точках перерізу при застосуваннях значень температур, які виміряні у ході проведення випробувань, у контрольних точках перерізу.

На рис. 2 відображено схему розташування датчиків контролю температур та розбиття перерізу стіни на зони, де будуть визначатися температури шляхом інтерполяції.

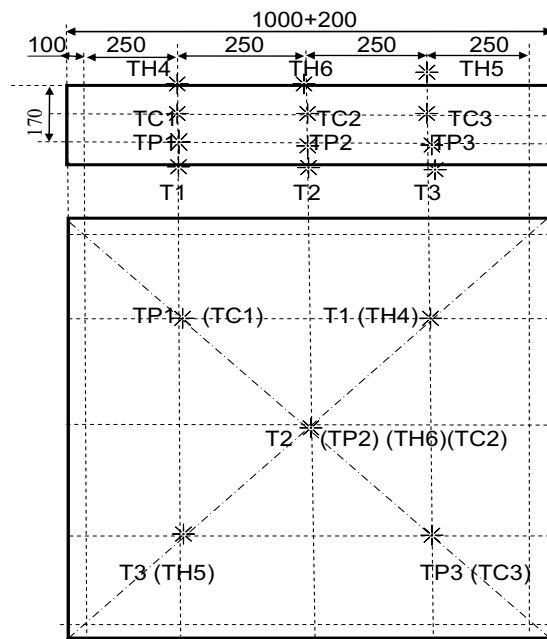


Рисунок 2. Схема розташування датчиків контролю температури та розбиття перерізу стіни на зони: на обігрівній поверхні зразка встановлені термопари T1 – T3; на рівні арматури терморезистори: TP1 – TP3; на не обігрівній поверхні (0,03 м від поверхні) терморезистори TN4 – TN6, по середині досліджуваного фрагменту TC1-TC3

Спосіб інтерполяції температур полягає у виконанні таких процедур:

1. За показниками термопар T₁₋₅, TP_{1-TP3}, TN₄₋₆, TC₁₋₃ знаходиться вираз, який апроксимує залежність температури від вертикальної координати вздовж поздовжньої вісі перерізу для кожного контрольного моменту часу k. Вираз має такий вигляд:

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

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;

T_k – показник ступеня параболи у k -тий момент часу.

Провівши розрахунок температурного поля, необхідно виконати розрахунок міцності стіни, на основі методики розрахунку міцності для колони, можливо створити частковий випадок для стіни, але необхідно врахувати, що для стіни властивий односторонній обігрів і, як наслідок, необхідно враховувати втрату цілісності та теплоізолювальної спроможності.

На рис. 3 показано метод розбиття стіни на зони. Показники цілісності та теплоізолювальної спроможності враховані, як на етапі експериментальних досліджень так і при проведенні розрахунків.



Рисунок 3. Розбиття залізобетонної стіни на зони для проведення розрахунку міцності

Відповідно до рис. 3, стіну можливо уявити як ряд колон, та використовувати математичний апарат для визначення міцності колон при нагріванні.

2. Необхідно задати початкові параметри функції, яка наближує ізотерму:

$$j = x_0 \left(1 - \left(\frac{i}{x_0} \right)^{p_0 - (p_{\max} - p_0) x_0^n} \right)^{\frac{1}{p_0 - (p_{\max} - p_0) x_0^n}} \quad (2)$$

де $p_0 = 1,8$, $p_{\max} = 15$ мінімальний та максимальний показники ступеня функції, який апроксимує ізотерми;

x_0 – початкове значення координати i функції, яка апроксимує ізотерми;

$n = n_0$ – параметр, який піддається пошуку при наближенні поверхні для інтерполяції температур у вузлових точках.

3. В кожній контрольній точці визначається x_0 шляхом розв'язку виразу (2), як рівняння при відомих значеннях i, j . За отриманим значенням x_0 встановлюється температура у контрольній точці за виразом (1).

4. Застосовуючи описаний алгоритм визначається значення температур у вузлових точках перерізу у кожний момент часу випробування.

5. В кожній зоні визначається середня температура за чотирма вузловими точками.

6. Температура в арматурних стержнях, де не проводилось вимірювання визначається за алгоритмом, як для будь-якої вузлової точки перерізу.

Напруження у ділянках бетону і арматурної сталі визначаються з використанням обраної моделі як функції граничних деформацій та кривизни стіни за виразами:

$$\sigma_{bi} = f_1(\varepsilon_{bi}), \quad \sigma_{sj} = f_2(\varepsilon_{sj}),$$

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{bi}, \quad \varepsilon_{si} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} Y_{sj}, \quad (3)$$

де ε_0 – відносна деформація крайової точки перерізу у напрямку найменшого моменту інерції;

$1/r$ – кривизна стіни.

В кожний контрольний момент часу перевіряється умова:

$$M_{вн, T} > N \cdot e_0, \quad (4)$$

де e_0 – ексцентриситет прикладеного навантаження відповідно до розрахункової схеми.

Якщо умова не виконується це означає, що настає межа вогнестійкості.

Момент від зовнішнього навантаження будується при використанні формули:

$$M_{N, T} = N \cdot (1/\rho) \cdot l_0 \cdot c^{-1}, \quad (5)$$

де $l_0 = \mu \cdot l$ – приведена висота (μ – коефіцієнт закріплення, l – висота стіни);

$c = 10$ – числовий параметр, який характеризує жорсткість системи.

Механічні властивості арматурної сталі при високих температурах та діаграмах її деформування визначаються, аналогічно до формул описаних в роботі [7].

Для того, щоб провести розрахунок оцінки межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, зокрема, стінових елементів на основі результатів прогрівання у спеціально створеній малогабаритній вогневій печі необхідні наступні дані (табл.1):

- показники датчиків контролю температури в кожен хвилину випробування, згідно зі схемою на рис. 2;
- клас міцності бетону та арматури;
- тип крупного заповнювача бетону;
- діаметри арматури;
- кількість та розташування стержнів, які показано на рис. 4.
- дані щодо геометричних розмірів перерізу стіни;
- товщина захисного шару бетону;
- розрахункова довжина стіни та розподілене навантаження.

Результати дослідження. Використання запропонованої методики на реальному прикладі несучої залізобетонної стіни. На рис. 4 продемонстровано схему армування та загальний вигляд перерізу стіни.

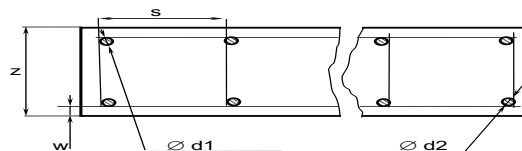


Рисунок 4. Схема перерізу несучої залізобетонної стіни

Відповідно до рис. 4 для проведення інтерполяції температур необхідно зазначити висоту, товщину захисного шару та товщину залізобетонної несучої стіни, знати клас та відповідні діаметри використаної арматури.

Таблиця 1. Основні параметри залізобетонної стіни

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри - висота - товщина захисного шару - товщина	b w z	4 0,03 0,20	м
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 30/35 (В30)	
Густина бетону	ρ_B	2230	кг/м ³
Робоча арматура: - діаметр більший - діаметр менший - крок	d_1 d_2 s	0,016 – Клас А500С 0,08 – Клас А240С 0,25	м

Після проведення інтерполяції були отримані розподіли температур, які показані на рис. 5.

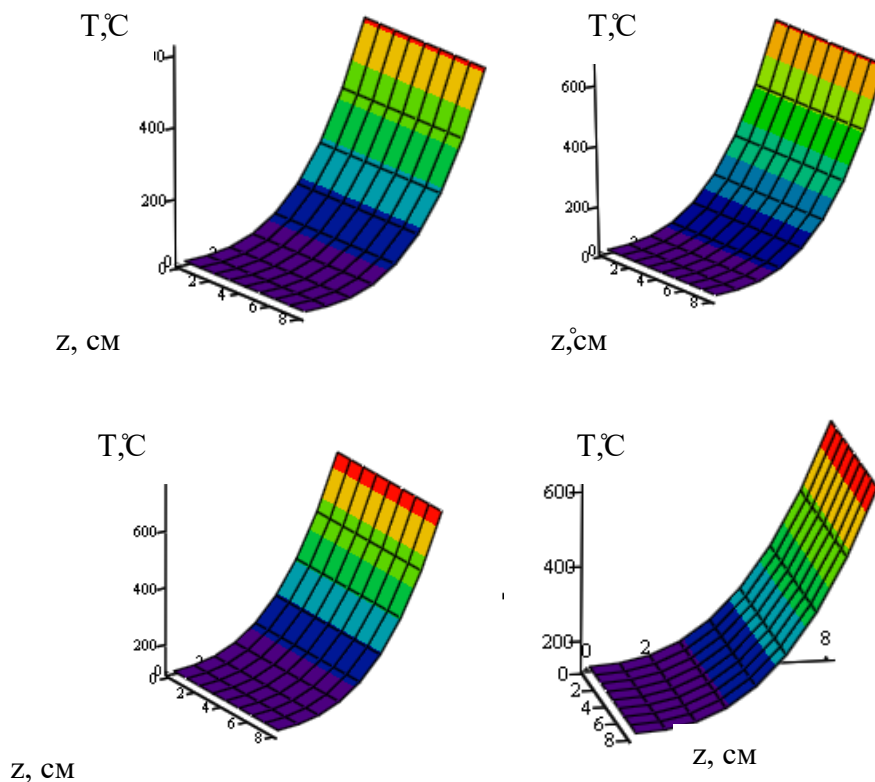


Рисунок 5. Результати проведеної інтерполяції температур за значеннями датчиків контролю температур визначених місць перерізу стіни

Для здійснення інтерполяції були взяті результати розрахунку теплової задачі для перерізу залізобетонної стіни згідно з рекомендаціями [6].

Для розв'язку задачі міцності використовується зонний метод, який полягає у розділенні перерізу ушкодженої зони, яка не здатна опиратися силовій дії механічного навантаження та зони, яка опирається механічним навантаженням на рівні не нагрітого бетону. Для цього необхідно:

1. Половину товщини перерізу поділити на n паралельних зон однакової товщини, де $n \geq 3$.
2. Для кожної із зон визначити середню температуру.
3. Визначити відповідний коефіцієнт зниження опору на стиск $k_c(\theta_i)$ за діаграмою зниження міцності бетону у залежності від температури, для кожної із зон.
4. Визначити середній коефіцієнт зниження опору на стиск, включаючи коефіцієнт $(1-0,2/n)$, який враховується при розрахунку зміни температури кожної зони за формулою, для перерізу елементу:

$$k_{c,m} = \frac{(1-0,2/n) \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i)}{n} \quad (6)$$

де:

n – кількість паралельних зон в ширині w ;

w – половина повної ширини;

m – кількість зон;

5. Відповідно до нижчезазначеної формули визначається, ширина пошкодженої зони перерізу для стін із стискальними навантаженнями:

$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right] \quad (7)$$

За отриманими значеннями максимальних моментів був побудований графік зниження несучої спроможності залізобетонної стіни, із зазначеними характеристиками, який поданий на рис. 6.

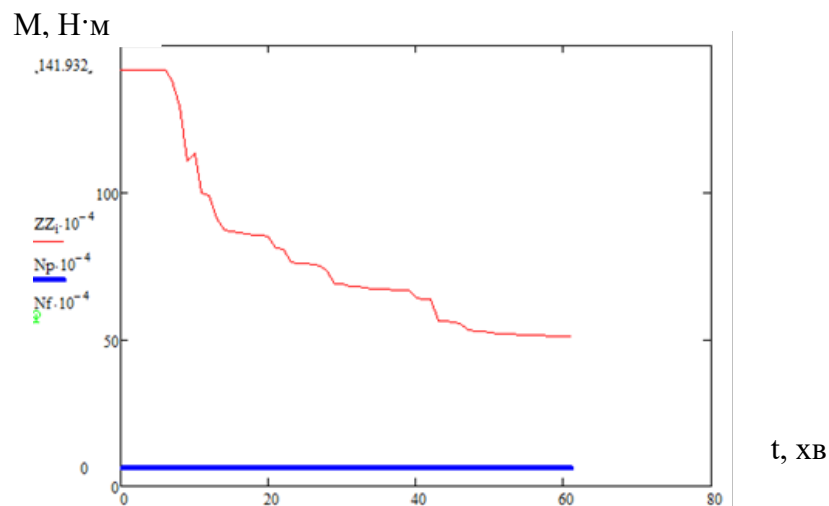


Рисунок 6. Графік зниження несучої спроможності стіни з розподіленим навантаженням 300 т

У результаті проведеного розрахунку було визначено, що межа вогнестійкості за 60 хв. не наступає.

Дані стіни відповідали характеристикам досліджуваного фрагменту та температурам прогрівання її слоїв при експерименті. Додатково вводились дані щодо висоти стіни та розподіленого навантаження, яке запроєктоване при роботі конструкції в будівлі. Таким чином, змінивши їх, можливо визначити межу вогнестійкості для стін інших габаритів, з іншим робочим навантаженням.

Для наочності на рис. 7 продемонстровано графік зниження несучої спроможності стіни з навантаженням 350 т.

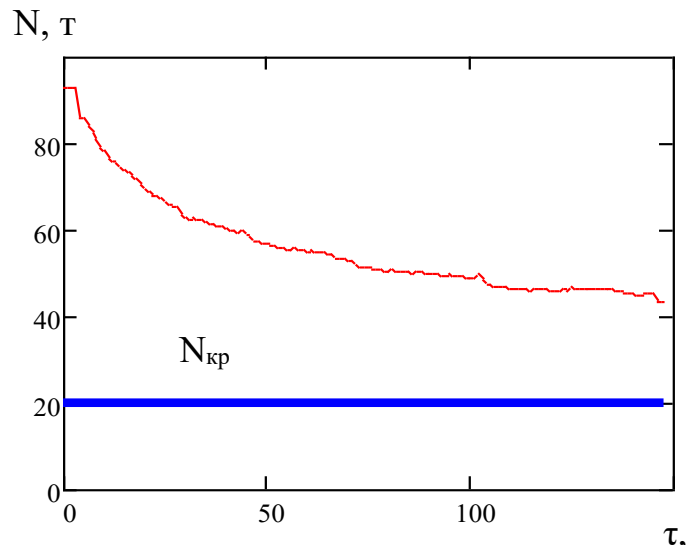


Рисунок 7. Графік зниження несучої спроможності стіни з розподіленим навантаженням 350 т

Як видно з рис. 6-7, межа вогнестійкості досліджуваних стін визначеної товщини та параметрів армування, досягнуто не було. Міцність стіни майже не знижується, за рахунок: одностороннього обігріву і арматури, яка знаходиться з необігрівного боку, яка продовжує виконувати свої функції при умові цілісності захисного шару бетону, а також тим, що стіна має достатню протяжність, на відміну від колони, тому її міцність у декілька разів вище.

Висновки. У даній роботі розкрито удосконалену методику оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі вимірювань температури у контрольних точках, відповідно до проведеного вогневого випробування в малогабаритній установці без механічного навантаження та врахуванні його під час розрахунків.

За результатами даної роботи встановлено наступне:

1. Розроблено алгоритм оцінки межі вогнестійкості несучої залізобетонної стіни на основі отриманих експериментальних даних за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження, яке лягає в основу загальної методики. В розрізі даного алгоритму виконано інтерполяцію температур у вузлових точках перерізу при застосуваннях значень температур, які виміряні у ході проведення випробувань, у контрольних точках перерізу.

2. Розроблено удосконалену методику інтерпретації даних температури прогріву несучої залізобетонної стіни, нагрівання фрагментів якої здійснювалось у малогабаритній вогневій печі за стандартним температурним режимом пожежі без навантаження, відповідно отримано дані, які можуть бути частиною експериментально-розрахункового методу оцінки межі вогнестійкості.

3. Представлено та описано удосконалену схему місць розташування датчиків контролю температури, яка забезпечує на 40 % менше термопар та більш раціональне їх розташування.

4. Визначено розподіли температур у перерізах несучих залізобетонних стін. Встановлено, що при зміні довжини виробу та розподіленого навантаження, яке запроєктоване при роботі конструкції в будівлі, можливо визначити межу вогнестійкості для несучих залізобетонних стін інших габаритів та з іншим робочим навантаженням, в роботі наведений приклад зниження несучої спроможності стіни висотою 4 м із розподіленим навантаженням 300 т. та порівняльний графік зниження несучої спроможності з навантаженням в 350 т.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Perehin, A., Nuianzin, O., Borysova, A., & Nuianzin, V. (2022). Results of Experimental Investigations of Reinforced Concrete Wall Elements According to the Standard Temperature Mode of Fire. In *Materials Science Forum* (Vol. 1066, pp. 206-215). Trans Tech Publications Ltd.

2. ДСТУ Б В.1.1-19-2007. Захист від пожежі. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість.

3. ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги.

4. С. В. Поздєєв, В. К. Словінський, С. Д. Щіпець (2013) Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх вогневих випробувань. *Пожежна безпека: теорія і практика. № 14.* 88-93.

5. С. В. Поздєєв, Ю. А. Отрош, А. М. Омельченко, С. Д. Щіпець, М. О. Кропива (2014) Інтерпретація результатів вогневих випробувань залізобетонних балок для оцінки їхньої межі вогнестійкості. *Промислове будівництво та інженерні споруди. № 2.* 14-18.

6. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT).

7. Нуянзін, О., Заїка, П., Черниш, Р., Ведула, С. (2022). Розрахункова оцінка межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, 6(2),* 82-94.

REFERENCES

1. Perehin, A., Nuianzin, O., Borysova, A., & Nuianzin, V. (2022). Results of Experimental Investigations of Reinforced Concrete Wall Elements According to the Standard Temperature Mode of Fire. In *Materials Science Forum* (Vol. 1066, pp. 206-215). Trans Tech Publications Ltd.

2. DSTU B V.1.1-19-2007. Zakhyst vid pozhezhi. Nesuchi stiny. Metod vyprobuvannia na vohnestiikist.

3. DSTU B V.1.1-4-98*. Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstruktsii. Metody vyprobuvan na vohnestiikist. Zahalni vymohy.

4. S. V. Pozdieiev, V. K. Slovinskyi, S. D. Shchipets (2013) Eksperymentalno-rozrakhunkovyi metod otsinky vohnestiikosti zalizobetonnykh kolon na osnovi yikh vohnevykh vyprobuvan. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka. № 14.* 88-93.

5. S. V. Pozdieiev, Yu. A. Otrosh, A. M. Omelchenko, S. D. Shchipets, M. O. Kropyva (2014) Interpretatsiia rezultativ vohnevykh vyprobuvan zalizobetonnykh balok dlia otsinky ikhnoi mezhi vohnestiikosti. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy. № 2.* 14-18.

6. DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 Yevrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist (EN 1992-1-2:2004, IDT).

7. Nuianzin, O., Zaika, P., Chernysh, R., & Vedula, S. (2022). Rozrakhunkova otsinka mezhi vohnestiikosti zalizobetonnoi balky za rezultatsy vohnevykh vyprobuvan bez mekhanichnoho navantazhennia. *Nadzvychnaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia, 6(2),* 82-94.

Alina PEREHIN (ORCID ID:0000-0003-2062-5537)
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes
of National University of Civil Protection of Ukraine

IMPROVEMENT OF THE CALCULATION ASSESSMENT OF THE LIMIT OF FIRE RESISTANCE OF A LOAD-BEARING REINFORCED CONCRETE WALL BASED ON THE RESULTS OF FIRE EXPERIMENTS

The purpose of this work is to develop an improved methodology for estimating the fire resistance limit of a load-bearing reinforced concrete wall based on temperature measurements at control points, according to a fire test conducted in a small-sized installation without mechanical load and taking it into account during calculations.

In this work, an algorithm for calculating the fire resistance limit of a load-bearing reinforced concrete wall based on the obtained experimental data based on the results of fire tests without mechanical load has been developed, which is the basis of the general methodology. The method of interpretation of data on the heating temperature of a load-bearing reinforced concrete wall, whose fragments were heated in a small-sized fire furnace according to the standard temperature regime of a fire without load, was improved; accordingly, the obtained data can be part of the experimental and calculation method of estimating the fire resistance limit. Due to the development of a more rational scheme for the locations of temperature control sensors (thermocouples), which are sufficient for data interpolation.

Temperature distributions in cross-sections of load-bearing reinforced concrete walls were determined. It was established that by changing the length of the product and the distributed load, which is designed during the operation of the structure in the building, it is possible to determine the fire resistance limit for load-bearing reinforced concrete walls of other dimensions and with a different working load.

Key words: *assessment of the fire resistance limit, load-bearing reinforced concrete wall, temperature, fire tests, fire furnace.*