

УДК 624.012

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.149.157>

*Світлана ФЕДЧЕНКО (ORCID: 0000-0003-3294-2214),
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РИГЕЛІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ

В статті було досліджено поведінку залізобетонного ригеля за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі та обґрунтовано метод ідентифікації механічних характеристик бетону, що ґрунтується на відтворенні розподілу температур у перерізах залізобетонних ригелів за результатами точкових вимірювань температури під час вогневих випробувань. В даному методі застосовуються рівняння рівноваги, складених з використанням деформаційної математичної моделі напружено-деформованого стану.

За отриманими експериментальними даними, було виконано відтворення температурних розподілів з використанням запропонованого методу інтерполяції. За отриманими температурними розподілами та запропонованим математичним апаратом було ідентифіковано коефіцієнт зниження міцності бетону залізобетонних ригелів при проведенні вогневих випробувань, був визначений максимальний прогин двох залізобетонних ригелів-зразків та використовуючи деформаційну модель, що заснована на використанні систем рівноваги внутрішніх шарів у перерізі залізобетонних ригелів уточнено коефіцієнт зниження міцності бетону за умовою впливу стандартного температурного режиму пожежі. Представлені криві залежності значення коефіцієнта зниження міцності бетону за запропонованим методом та за рекомендаціями Eurocode 2 вказують на наявність відхилення між даними показниками. Отримана уточнена залежність коефіцієнта зниження міцності бетону є підґрунтям для удосконалення розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонних ригелів на основі деформаційних моделей.

Ключові слова: *залізобетонний ригель, вогнестійкість, стандартний температурний режим, максимальний прогин, розрахунковий метод, механічні характеристики бетону.*

Постановка проблеми. Основною вимогою, яка визначає надійність будівельного об'єкта, є його відповідність призначенню й здатність зберігати протягом встановленого терміну експлуатації необхідні експлуатаційні якості, до яких належать: гарантія безпеки для здоров'я і життя людей, майна та довкілля; збереження цілісності об'єкта та його основних частин і виконання інших вимог, які гарантують можливість використання об'єкта за призначенням, обмеження ступеня ризику шляхом виконання вимог до вогнестійкості тощо. Будівельні конструкції, як складові частини будівельного об'єкта, повинні відповідати наступним вимогам: сприймати без руйнувань і недопустимих деформацій впливи, що виникають під час їх зведення та встановленого терміну експлуатації; мати достатню роботоздатність в умовах нормальної експлуатації протягом усього встановленого терміну експлуатації; мати достатню живучість по відношенню до локальних руйнувань і передбачених нормами аварійних впливів (пожеж, вибухів).

Основним недоліком при прогнозуванні ефективного функціонування залізобетонних будівельних конструкцій є закладання недостатнього запасу їх міцності в умовах пожежі. Найбільшу небезпеку обвалення в таких умовах представляють зігнуті елементи конструкцій, оскільки вони мають найбільші габарити і навантаження.

Для підвищення надійності будівель в умовах теплового впливу пожежі, одним з найбільш ефективних способів є забезпечення нормованої межі вогнестійкості на основі методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій даної будівлі, зокрема залізобетонних ригелів. На даний час існуючі методи мають достатній розвиток і складають ієрархічну структуру від найпростіших у її основі до складних, що здійснюється із залученням комп'ютерних програмних та апаратних засобів. Проте, для реалізації даних методів необхідний комплекс початкових даних, що включає термомеханічні характеристики матеріалів. На сучасному етапі досконалі відомості про міцність бетону залізобетонних ригелів в умовах теплового впливу пожежі потребують уточнення з метою підвищення достовірності даних, отриманих методами розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних ригелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вогнестійкість залізобетонних ригелів має відповідати нормативно-технічним нормам, де встановлені основні принципи її забезпечення [1]. Для оцінки вогнестійкості даних конструкцій існує два основних підходи, з яких найбільш надійнішим і достовірним вважається метод вогневих випробувань [2]. Метод вогневих випробувань здійснюється шляхом впливу високих температур на зразок досліджуваної конструкції у спеціальній установці, що включає вогневу піч та систему прикладення відповідного механічного навантаження. Важливою особливістю даного метода є створення умов, при яких в камері вогневої печі забезпечується стандартний температурний режим пожежі [3]. Реалізація вогневих випробувань пов'язана із певними технічними складностями та значними трудовими, і матеріальними затратами.

Другий підхід – ґрунтується на проведенні розрахункової оцінки вогнестійкості [4]. Основними перевагами такого підходу є гнучкість, можливість врахувати всі типи граничних умов, матеріалів, геометричних розмірів та інших параметрів залізобетонних ригелів, а також вони є набагато менш трудомісткими та вартісними [5].

Більшість розрахункових методів оцінки вогнестійкості засновані на гіпотезах опору матеріалів і добре працюють при врахуванні повної інформації про поведінку залізобетонних ригелів в умовах пожежі [1,3]. Неточність інформації про термомеханічні характеристики матеріалів накладає обмеження на застосування розрахункових методів і зменшує їхні переваги у порівнянні із експериментальними методами. Для усунення цих недоліків є ефективним комплексне застосування підходів, що дозволяють уточнення властивостей бетону та залізобетону на основі узагальнення та інтерпретації даних, отриманих у результаті вогневих випробувань. З огляду на викладене, можна зазначити важливість та актуальність задач вивчення механічних властивостей матеріалів залізобетонних ригелів на основі узагальнення та інтерпретації результатів вогневих випробувань.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка методики розрахунку зниження міцнісних властивостей бетону залізобетонних ригелів в залежності від температури в умовах теплового впливу пожежі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити алгоритм визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу.

2. Розробити алгоритм ідентифікації коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля безпосередньо у конструкції за результатами проведених

вогневих випробувань та отримати уточнену залежність коефіцієнта зниження міцності бетону від температури при стандартному температурному режимі пожежі, на основі деформаційних моделей [6].

3. Побудувати графіки залежності коефіцієнту зниження міцності бетону за стандартною залежністю та усереднена залежністю для зразків № 1 та № 2 із відхиленнями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети, застосовуючи підхід, запропонований у роботі [7] був розроблений метод ідентифікації залежності коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонних ригелів, схема здійснення якого подана на рис. 1.

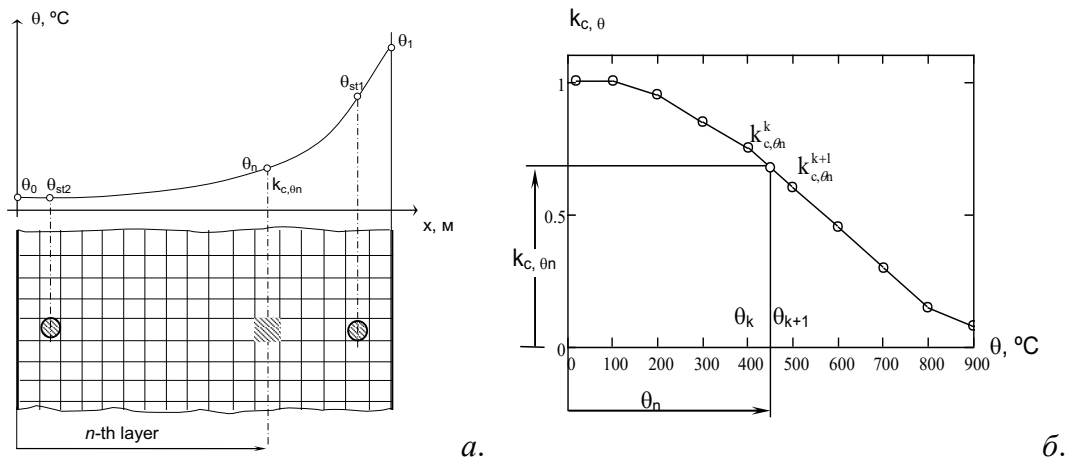


Рисунок 1. Обчислення коефіцієнту зниження міцності бетону залізобетонного ригеля за температурою у внутрішньому шарі: а – схема розбиття на шари перерізу залізобетонного ригеля; б – схема лінійної залежності коефіцієнту зниження міцності бетону залізобетонного ригеля за табличними даними

Метод ідентифікації залежності зниження міцності бетону залізобетонних ригелів ґрунтується на проведенні розрахунків температурних розподілень у перерізах досліджуваних залізобетонних ригелях, побудові діаграм деформування за уточненими даними щодо коефіцієнтів зниження міцності бетону та проведенні міцнісного розрахунку з використанням програмного забезпечення.

Визначення температур, у будь-якій точці перерізів залізобетонних ригелів, за точковими вимірюваннями температури у їх внутрішніх шарах, у ході високотемпературних випробувань за стандартним температурним режимом пожежі здійснювалося розробленим методом інтерполяції, що наведений на рис. 2.

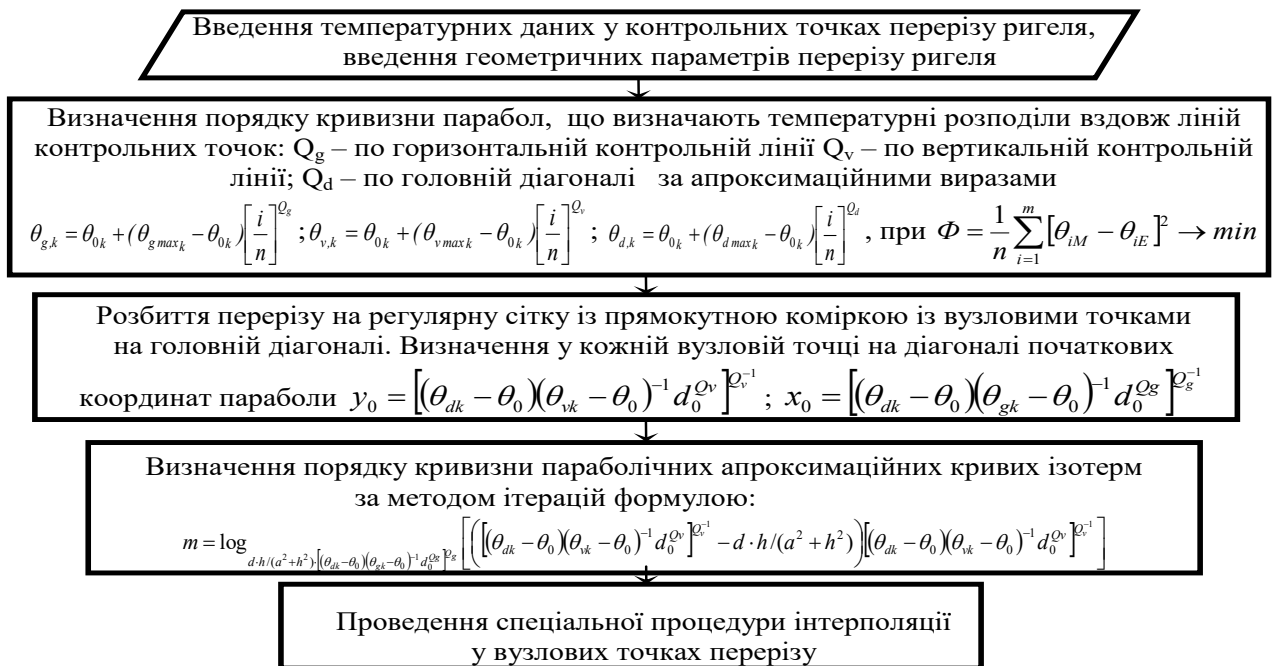


Рисунок 2. Алгоритм визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу

З метою ідентифікації коефіцієнта зниження міцності бетону випробуваних залізобетонних ригелів при проведенні вогневих випробувань виміряний максимальний прогин залізобетонних ригелів-зразків.

Для проведення ідентифікації коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля був використаний підхід, описаний в роботі [7]. Визначення напружено-деформованого стану у перерізі залізобетонного ригеля в умовах нагрівання описано за допомогою деформаційної моделі, що заснована на використанні систем рівноваги внутрішніх шарів у перерізі. Система рівнянь рівноваги має такий вигляд:

$$[\mathbf{F}]\{\mathbf{k}\} + \{\mathbf{S}\} = M_{Ed}, \quad (1)$$

де $\{\mathbf{k}\} = (k_{c1} \ k_{c2} \ \dots \ k_{cm})^T$ – вектор значень коефіцієнтів зниження міцності бетону залізобетонного ригеля відповідних табличним значенням температур $\{\Theta_m\} = (0 \ 100 \ 200 \ \dots \ \theta_m)^T$, які є невідомими записаної СЛАР; M_{Ed} – діючий момент у залізобетонному ригелі.

Тут $[\mathbf{F}]$ – матриця коефіцієнтів СЛАР, що має такий вигляд:

$$[\mathbf{F}] = \begin{pmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & & Z_{ij} & & Z_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mj} & \dots & Z_{mm} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де параметри матриці коефіцієнтів обчислюються за виразами:

$$Z_{i1} = \sum_n [1 - 0.01(\theta_{ni} - \theta_1)] F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n, \quad Z_{im} = \sum_n 0.01(\theta_{ni} - \theta_{m-1}) F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n$$

$$Z_{ij} = \sum_n [1 - 0.01(\theta_{ni} - \theta_j)] F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n + \sum_n 0.01(\theta_{ni} - \theta_{j-1}) F_n(\varepsilon, \theta_{ni}) A_c y_n. \quad (3)$$

Величина $m = [\theta_{\max} \cdot 0.01]$ – це кількість рівнянь та перемінних у СЛАР (1), що обчислюється за максимальною температурою нагрівання залізобетонного ригеля під час вогневих випробувань.

При записі рівнянь для конкретних моментів часу випробувань величина максимального прогину встановлюється рівномірно між першим моментом часу випробувань та часом коли зберігається відповідність епюри деформацій та напружень лінійній залежності.

У СЛАР (1) $\{S\}$ – це вектор зусиль у арматурних стержнях, який обчислено з використанням такої формули:

$$\{S\} = (S_1 \dots S_i \dots S_m)^T, \quad (4)$$

де $S_i = \sum_p F_{st,p}(\varepsilon, \theta_{st,p})$. Зусилля у p -тому арматурному стержні в i -тий момент часу обчислюються за виразами, рекомендованими настановами щодо розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій [5].

Деформації бетону та арматурної сталі визначаються за виразами [7]:

$$\varepsilon_{ci} = \varepsilon_0 + y_{ci} \chi_t, \quad \varepsilon_{si} = \varepsilon_0 + y_{si} \chi_t, \quad (5)$$

де ε_0 – відносна деформація верхньої точки перерізу залізобетонного ригеля у поперечному напрямку;

χ_t – кривизна залізобетонного ригеля в певний момент часу.

Відносна деформація верхньої точки та кривизна перерізу залізобетонного ригеля обчислена з використанням гіпотези плоских перерізів за формулами:

$$\varepsilon_0 = \frac{h^2 \chi_t}{2h - z_0}, \quad \chi_t = \frac{48w_t}{5L^2}, \quad (6)$$

де L – довжина прольоту залізобетонного ригеля;

w_t – максимальний прогин залізобетонного ригеля в певний момент часу;

z_0 – осьова відстань від крайнього арматурного стержня до нижнього краю перерізу залізобетонного ригеля.

Для здійснення методу ідентифікації залежності коефіцієнту зниження міцності бетону від температури було проведено випробування залізобетонного ригеля, конструктивна схема якого наведена на рис. 3.

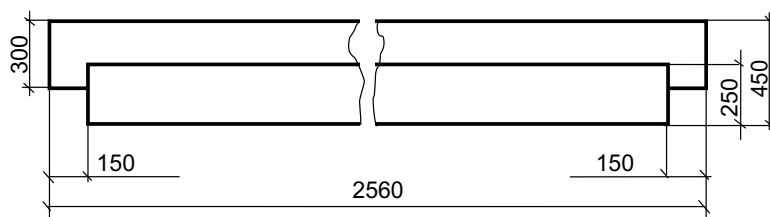


Рисунок 3. Схема геометричної конфігурації залізобетонного ригеля-зразку для випробування

На рис. 4 наведена схема вимірювання температури у внутрішніх шарах ригеля.

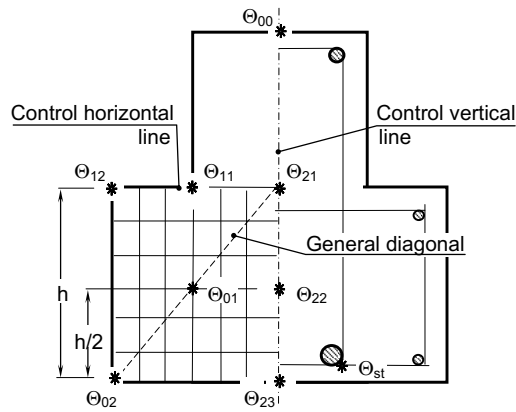


Рисунок 4. Схема розташування термопар у перерізі залізобетонного ригеля-зразку для випробувань

Під час здійснення вогневих випробувань зразків залізобетонних ригелів було проведено вимірювання температури у контрольних точках перерізу, розташованих згідно зі схемою, поданою на рис. 4 [8, 9]. Для відтворення температурних полів у перерізі через кожну хвилину було застосовано алгоритм, наведений на рис. 2. Після проведення відповідних обчислень були отримані температурні розподілення, які подані на рис. 5.

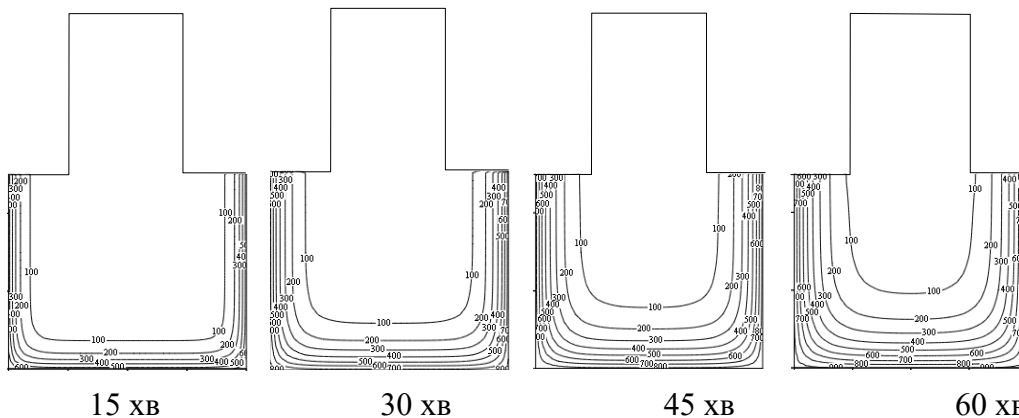


Рисунок 5. Температурні розподіли у залізобетонному ригелі, визначені у результаті розрахунку (°C)

Для здійснення методу ідентифікації коефіцієнта зниження міцності у ході вогневих випробувань було побудовано криві залежності максимального прогину залізобетонних ригелів від часу випробування, яка подана на рис. 6.

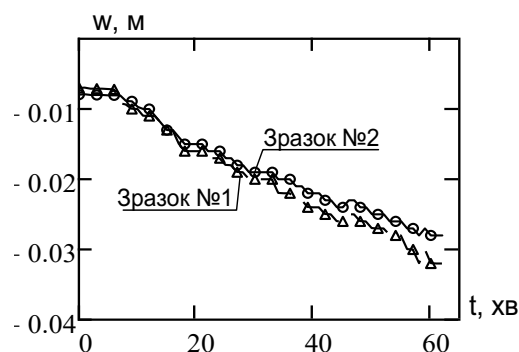


Рисунок 6. Залежність найбільшого прогину зразків залізобетонних ригелів

З використанням результатів вимірювань температури та максимального прогину залізобетонного ригеля, одержаних у ході вогневих випробувань та математичних моделей, виражених формулами (1) – (6) був ідентифікований коефіцієнт зниження міцності бетону від температури, наведений на рис. 7. На рис. 7 також представлені криві залежності значення коефіцієнта зниження міцності бетону за запропонованим методом та за рекомендаціями Eurocode 2 [10, 11].

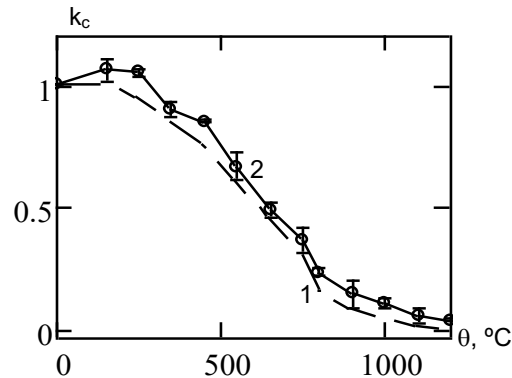


Рисунок 7. Графіки залежності коефіцієнту зниження міцності бетону: 1 – стандартна залежність, 2 – усереднена залежність для зразків № 1 та № 2 із відхиленнями

На рис. 7 побудовано графіки залежності коефіцієнту зниження міцності бетону за стандартною залежністю та усереднена залежністю для зразків № 1 та № 2 із відхиленнями. Дані засвідчують, що криві залежності значення коефіцієнта зниження міцності бетону за запропонованим методом та за рекомендаціями Eurocode 2 вказують на наявність відхилення між зазначеними показниками.

Таким чином, було отримано уточнену методику розрахунку коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних ригелів, що дозволяє підвищити точність розрахункового метода оцінки вогнестійкості для елементів конструкцій даного типу на 11%.

Висновки. Цінність результатів проведених досліджень полягає в уточненні залежності коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля у залежності від температури, що є науковим підґрунтям для удосконалення розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонних ригелів на основі деформаційних моделей. При цьому можна зробити такі висновки.

1. Обґрунтовано алгоритм визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу.

2. Розроблено алгоритм ідентифікації коефіцієнта зниження міцності бетону залізобетонного ригеля безпосередньо у конструкції за результатами проведених вогневих випробувань та отримати уточнену залежність коефіцієнта зниження міцності бетону від температури при стандартному температурному режимі пожежі, на основі деформаційних моделей, що дозволило побудувати графіки залежності коефіцієнту зниження міцності бетону за стандартною залежністю та усереднена залежністю для зразків № 1 та № 2 із відхиленнями.

3. Отримано уточнену методику розрахунку коефіцієнта зниження міцності бетону для залізобетонних ригелів, що дозволяє підвищити точність розрахункового метода оцінки вогнестійкості для елементів конструкцій даного типу на 11%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kodur, V.K.R. (2005), "Guidelines for Fire Resistance Design of High-Strength Concrete Columns," J. of Fire Protection Engineering 15:2 (2005) 93-106.
2. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley. Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings. NIST Technical Note 1681. 2010. 217 p.
3. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги (ISO 834:1975): ДСТУ Б В.1.1-4-98*. – [Чинний від 1998-10-28]. – К.: Укрархбудинформ, 1999. – 21с. – (Державний стандарт України).
4. Lie T.T. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members. International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety, 22/23, February 1983/pp.139-153
5. Pozdieiev S., Nekora O., Slovynsky V. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method // MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024, DOI: 10.1051/matecconf/201711602024.
6. Поздєєв С. В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних балок. / Поздєєв С. В. // Пожежна безпека : [зб. наук. праць]. – Л.: ЛДУБЖД. – № 17. – 2010. – С. 115–122.
7. Щіпець С. Д. Удосконалення методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних та кам'яних несучих стін.: дис. канд. тех. наук: 21.06.02 / Щіпець Станіслав Дмитрович. Львів, 2015. 160 с.
8. Lamont, S., B. Lane, A. Usmani, and D. Drysdale (2003), "Assessment of the Fire Resistance Test with Respect to Beams in Real Structures," Engrg. J. AISC 40:2 (2003), 63-75.
9. Поздєєв С. В. 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.
10. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004
11. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels, 2004), p. 99.

REFERENCES

1. Kodur, V.K.R. (2005), "Guidelines for Fire Resistance Design of High-Strength Concrete Columns," J. of Fire Protection Engineering 15:2 (2005) 93-106.
2. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley. Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings. NIST Technical Note 1681. 2010. 217 p.
3. Building structures. Test method for fire resistance. General requirements. Fire safety. (ISO 834: 1975) DSTU B V.1.1-4-98 *. [Effective from 1998-10-28.] – Kyiv: Ukrarkhbudinform, 1999. 21 p. (The National Standard of Ukraine).
4. Lie T.T. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members. International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety, 22/23, February 1983/pp.139-153
5. Pozdieiev S., Nekora O., Slovynsky V. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method // MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024, DOI: 10.1051/matecconf/201711602024.

6. Pozdieiev S.V. Study of the effectiveness of mathematical models of the stress-strain state in determining the fire resistance of reinforced concrete beams. / S.V. Pozdieiev // Fire safety: [Coll. of science works]. – L.: LDUBZHD– № 17. – 2010. – pp. 115–122.

7. Shchipets S.D. Improvement of the method of testing the fire resistance of reinforced concrete and stone load-bearing walls: Ph.D. thesis in technical sciences: 21.06.02.-Lviv, 2015.-160 p.

8. Lamont, S., B. Lane, A. Usmani, and D. Drysdale (2003), “Assessment of the Fire Resistance Test with Respect to Beams in Real Structures,” *Engrg. J. AISC* 40:2 (2003), 63-75.

9. Pozdieiev S.V. Experimental-calculation method of assessing the fire resistance of reinforced concrete columns based on their fire tests / S.V. Pozdieiev, V.K. Slovynsky, S.D. Shchipets // Fire safety: theory and practice: coll. of science works – Cherkasy: AFS, 2013. – №. 14. – pp. 88 – 93.

10. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004..

11. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels, 2004), p. 99.

Svitlana FEDCHENKO (ORCID: 0000-0003-3294-2214),
*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes
of National University of Civil Protection of Ukraine*

JUSTIFICATION OF THE METHOD OF IDENTIFYING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS ACCORDING TO THE RESULTS OF FIRE TESTS

The article investigated the behavior of a reinforced concrete crossbar under the conditions of exposure to the standard fire temperature regime and substantiated the method of identifying the mechanical characteristics of concrete, which is based on the reproduction of the temperature distribution in the cross-sections of reinforced concrete beams based on the results of point temperature measurements during fire tests. In this method, the equations of equilibrium are used, compiled using the deformation mathematical model of the stress-strain state.

Based on the obtained experimental data, the temperature distributions were reproduced using the proposed interpolation method. According to the obtained temperature distributions and the proposed mathematical apparatus, the coefficient of reduction in the concrete strength of reinforced concrete beams during fire tests was identified, the maximum deflection of two sample reinforced concrete beams was determined, and using a deformation model based on the use of equilibrium systems of internal layers in the cross section of reinforced concrete beams, the coefficient of reduction of strength of concrete under the condition of exposure to the standard fire temperature regime was specified. The presented curves of the value of the coefficient of reduction of concrete strength according to the proposed method and according to the recommendations of Eurocode 2 indicate the presence of a deviation between these indicators. The resulting refined dependence of the concrete strength reduction factor is the basis for improving the calculation method for assessing the fire resistance of reinforced concrete crossbars based on deformation models.

Key words: *reinforced concrete crossbar, fire resistance, standard temperature regime, maximum deflection, calculation method, mechanical characteristics of concrete.*