

УДК 624.012

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.99.106>

*Сергій ПОЗДЄЄВ*, доктор технічних наук, професор (ORCID: 0000-0002-9085-0513),

*Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ*, кандидат технічних наук, доцент  
(ORCID: 0000-0002-4043-1206),

*Ірина РУДЕШКО* (ORCID: 0000-0003-3294-2214),

*Тетяна КОСТЕНКО*, доктор технічних наук, професор (ORCID: 0000-0001-9426-8320),

*Станіслав СІДНЕЙ*, кандидат технічних наук (ORCID: 0000-0002-7664-6620),

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІЄРАРХІЧНОГО ПІДХОДУ ЩОДО РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ЗА ЄВРОКОДОМ 2

У роботі представлені основні розрахункові методики щодо оцінки вогнестійкості за табличним, зонним та уточненим методами залізобетонних балок з прямокутним перерізом, із одиночним дворядним армуванням, що рекомендовано у Єврокодi 2. За результатами проведених обчислювальних експериментів проведений порівняльний аналіз показників вогнестійкості цих конструкцій. Рівень навантаження на залізобетонну балку було прийнято 50 % від несучої здатності.

При проведенні уточненого розрахунку оцінки вогнестійкості використовувався метод кінцевих елементів. За результатами уточненого методу межа вогнестійкості досліджуваної конструкції склала 139,15 хв.

**Ключові слова:** залізобетонна балка перекриття, розрахункові методи оцінки вогнестійкості, кінцево-елементна модель, стандартний температурний режим пожежі.

**Постановка проблеми.** Визначення межі вогнестійкості окремих конструкцій і конструктивних систем є дуже важливим етапом проектування будівлі і гарантії її безпечної експлуатації [1]. Під час проведення проектування будь-яких будівель та споруд необхідно застосовувати будівельні конструкції, які спроможні необхідний час чинити опір підвищеним температурам від пожежі не переходячи у будь-який граничний стан з вогнестійкості. Подібні задачі розв'язуються завдяки проведенням оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій [2].

Сьогодні єдиним методом визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, що нормативно затверджено, є натурні випробовування [3]. Вони проводяться за стандартною методикою за режимом стандартної або реальної пожежі [3, 4]. Розрізняють стандартні вогневі випробування, що проводять на окремих конструкціях, і повномасштабні, що проводяться на будівлях або окремих її блоках у реальних розмірах [3, 4]. Всі ці випробовування мають проводитися у спеціальних лабораторіях на спеціальному обладнанні із використанням спеціального устаткування і тому потребують значних фінансових і трудових затрат [5]. У зв'язку із цим стає раціональним використовувати розрахункові методи визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, які відображають реальну роботу конструкцій. Розрахункові методи за [6] базуються на введенні під час розрахунку понижуючих коефіцієнтів на характеристики матеріалів.

За рекомендаціями [6, 7] передбачено використання 3-х розрахункових методів, які враховують повзучість, усадку, фізичну і геометричну нелінійність, діаграми розтягу і стиску бетону і арматури за умови дії температури. З'являється

необхідність порівняння цих методів, оскільки інформації про точність розрахунків вогнестійкості за цими методами недостатньо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує декілька видів розрахункових методів оцінки вогнестійкості. У [6, 7] рекомендується використання наступних методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій: табличний, зонний та уточнений метод.

Вибір методу розрахунку конструкції приймається у відповідності до табл. 1 на основі аналізу її реальної роботи у складі всієї конструктивної системи. При розрахунку вогнестійкості конструкцій пропонується використання трьох груп розрахункових методик.

Таблиця 1. Методи перевірки вогнестійкості будівельних конструкцій [2]

Вид розрахунку	Метод розрахунку		
	Табличні дані	Спрощені методи розрахунку	Уточнені методи розрахунку
Аналіз окремої Конструкції. Кожна конструкція розглядається окремо. Непрямі вогневі впливи не враховуються, за винятком тих, які є результатом перепаду температур	Так - дані наведено тільки для стандартного температурного режиму; - дані можуть бути перероблені для інших температурних режимів пожежі	Так - стандартний та параметричний температурні режими; - температурні криві наведено тільки для стандартного температурного режиму; - моделі, що враховують зміну властивостей матеріалів, застосовуються тільки для температурних режимів, аналогічних стандартному.	Так наведено тільки основні положення
Аналіз частини конструктивної системи Враховуються непрямі вогневі впливи у вузлі, але не залежної від часу взаємодії з іншими частинами конструктивної системи.	Ні	Так - стандартний та параметричний температурні режими; - температурні криві наведено тільки для стандартного температурного режиму; - моделі, що враховують зміну властивостей матеріалів, застосовуються тільки для температурних режимів, аналогічних стандартному.	Так наведено тільки основні положення
Загальний аналіз конструктивної системи. Аналіз всієї конструктивної системи. Розглядаються непрямі вогневі впливи на всю конструктивну систему.	Ні	Ні	Так наведено тільки основні положення

Експериментальний метод передбачає стандартні вогневі випробування і повномасштабні випробування натурних зразків конструкцій. Згідно табличного методу вогнестійкість конструкції забезпечується її конструктивним рішенням відповідно табличних даних, що засновані на раніше проведених теоретичних та експериментальних дослідженнях [6, 7].

Метод спрощених розрахунків дає змогу швидко і приблизно оцінити вогнестійкість будівельних конструкцій. Спрощені методи розрахунку застосовуються на основі використання приведенного перерізу та коефіцієнтів зниження несучої здатності бетону та арматури внаслідок дії температури від стандартного температурного режиму пожежі. Уточнені методи розрахунку мають базуватися на фундаментальних фізичних передумовах, що ведуть до одержання найбільш достовірних даних про очікувану роботу будівельної конструкції під час пожежі [8, 9].

Метод уточнених розрахунків ґрунтується на розгляді математичних моделей [10]. Математична модель складається з основних рівнянь процесів тепломасообміну і напружено-деформованого стану та рівнянь, що визначають початкові та граничні умови, а також коефіцієнтів, що входять до рівнянь. Реалізація цих методів можлива за допомогою програмних комплексів на основі методу кінцевих елементів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є проведення порівняльного аналізу досліджень з оцінки вогнестійкості залізобетонних балок використовуючи табличний, зонний та уточнений розрахункові методи. Для досягнення мети поставлено для розв'язання наступні завдання:

1. Використовуючи таблиці вільноопертих залізобетонних балок за рекомендаціями [6, 7] перевірити відповідність до класу вогнестійкості R120 за геометричними параметрами по ширині перерізу та відстані до вісі арматури.

2. Визначити несучу здатність досліджуваної залізобетонної балки в умовах впливу пожежі через 120 хв застосовуючи спрощену методика зонного методу із навантаженням 50% від несучої здатності конструкції [6, 7].

3. Створити геометричну модель залізобетонної балки з прямокутним перерізом, із одиночним дворядним армуванням за геометричними параметрами, що відповідає досліджуваної конструкції.

4. Побудувати кінцево-елементу сітку, для розв'язання тепломеханічної задачі щодо визначення межі вогнестійкості залізобетонної балки з прямокутним перерізом, із одиночним дворядним армуванням.

**Виклад основного матеріалу із обґрунтуванням отриманих результатів.** Дослідження з оцінки вогнестійкості, проводилось по залізобетонній балці розмірами перерізу 300x600 мм, прямокутного перерізу, із одиночним дворядним армуванням: 4Ø22A400C. Балку виготовлено із бетону класу C30/35, відстань до осі нижнього рівня арматури 50мм, до осі верхнього рівня арматури 120мм, рівень діючого навантаження складає 0,50 від руйнівного. Умови обігріву було прийнято з трьох сторін. За табличним та зонним методом було перевірено відповідність класу вогнестійкості досліджуваної конструкції R120.

Використовуючи таблиці з мінімальними розмірами та відстані до осі арматури вільно опертих балок, із ненапруженого та попередньо напруженого залізобетону [6, 7] встановлено, що при ширині залізобетонної балки 300 мм мінімальна відстань до осі арматури повинна бути не менше ніж 55 мм (табл. 1). Таким чином недостатність відстані до вісі арматури першого ряду не надає можливість відповідати досліджуваної конструкції класу вогнестійкості R120.

Таблиця 2

Нормована вогнестійкість	Мінімальні розміри, мм						
	Можливі сполучення $a$ та $b_{min}$ , де $a$ – середня відстань до осі арматури, а $b_{min}$ – ширина балки				Товщина стінки балки, $b_w$		
					Клас WA	Клас WB	Клас WC
R30	$b_{min}=80$ $a=25$	120 20	160 15*	200 15*	80	80	80
R60	$b_{min}=120$ $a=40$	160 35	200 30	300 25	100	80	100
R90	$b_{min}=150$ $a=50$	200 45	300 40	400 35	110	100	100
R120	$b_{min}=200$ $a=65$	240 60	300 55	500 50	130	120	120
R180	$b_{min}=240$ $a=80$	300 70	400 65	600 60	150	150	140
R240	$b_{min}=280$ $a=90$	350 80	500 75	700 70	170	170	160

При проведенні розрахунку за зонним методом сценарій впливу пожежі прийнятий з трьох сторін [6, 7].

За результатами визначення необхідних показників температури у бетоні та арматурі проведений механічний розрахунок, що враховує зменшений переріз досліджуваної залізобетонної балки та знижені механічні властивості арматури при умові впливу стандартного температурного режиму пожежі. Несуча здатність досліджуваної конструкції при пожежі терміном 120 хв ( $M_{Rd,fi}=96,6$  кНм) більша за діюче навантаження при пожежі ( $M_{Ed,fi}=91,5$  кНм). Умова міцності при пожежі виконується, тобто за зонним методом встановлено, що залізобетонна балка відповідає класу вогнестійкості R 120, однак межа відповідності несучої спроможності конструкції наближаються до рівня діючого навантаження, при тому дана залізобетонна балка навантажена на 50% від руйнівного показника.

Уточнений метод розрахунку оцінки вогнестійкості досліджуваної залізобетонної балки виконувався за допомогою обчислювальних експериментів при використанні методу кінцевих елементів [10].

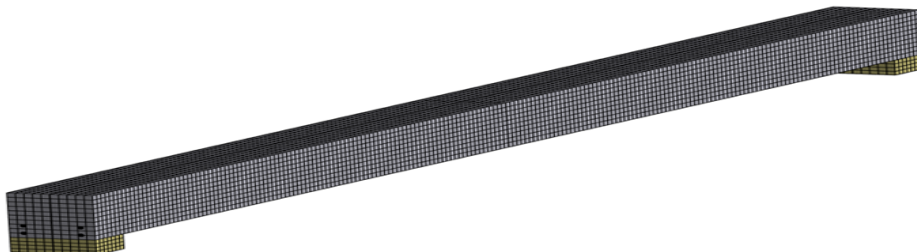


Рисунок 1. Кінцево-елементна модель залізобетонної балки з прямокутним перерізом, із одиночним дворядним армуванням перерізом 300мм x 600 мм

З метою вирішення тепломеханічної задачі з оцінки вогнестійкості залізобетонної балки з прямокутним перерізом, із одиночним дворядним армуванням,

тепловий вплив від пожежі прийняти у відповідності до стандартного температурного режиму, який визначається залежністю [1]:

$$\theta_s = \quad (1)$$

де  $t$  – час, що відраховується від початку випробування, хв;

$\theta_s$  – температура, яка відповідає часу  $t$ , °C.

Для розв'язання теплової задачі використовується нестационарне двовимірне квазілінійне рівняння теплопровідності у допущенні, що напружено-деформований стан на не впливає на розподіл температури. Задані граничні умови III-го роду представлені у табл. 1. [7, 9].

Таблиця 3 – Параметри граничних умов

Параметри граничних умов теплотехнічної задачі	Одиниці виміру	Величина
Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні, що обігривається	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	25
Коефіцієнт конвекційного теплообмін на поверхні, що не обігривається	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	9
Ступінь чорноти	-	0.7
Постійна Стефана-Больцмана	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	5.67·10 <sup>-8</sup>

При проведенні обчислювальних експериментів використовувались теплофізичні характеристики бетону та сталі залежні від температури [6, 7]. Температурні залежності даних показників представлені на рис. 2, 4.

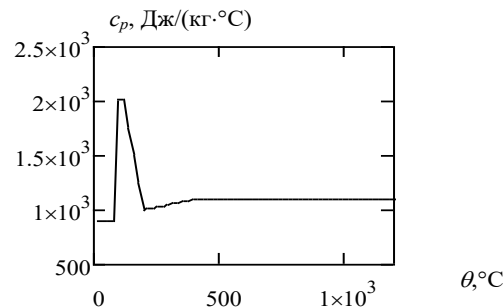


Рисунок 2 – Теплофізичні характеристики бетону C35

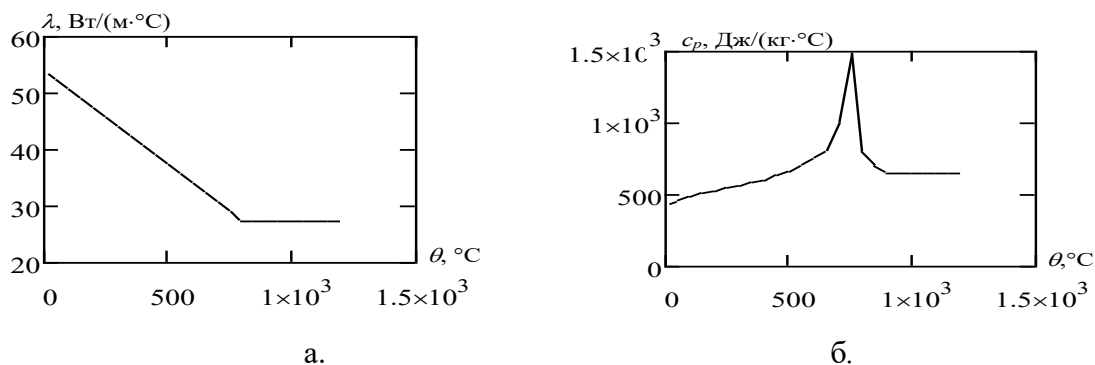


Рисунок 3 – Теплофізичні характеристики сталі C400 (теплопровідність – а, теплоємність – б)

За результатами обчислювального експерименту встановлено, що критичний прогин залізобетонної балки складає – 261,74 мм та виникає на 139,15 хв обчислювального експерименту, що є ознаками настання граничного стану з вогнестійкості за втратою несучої здатності [4].

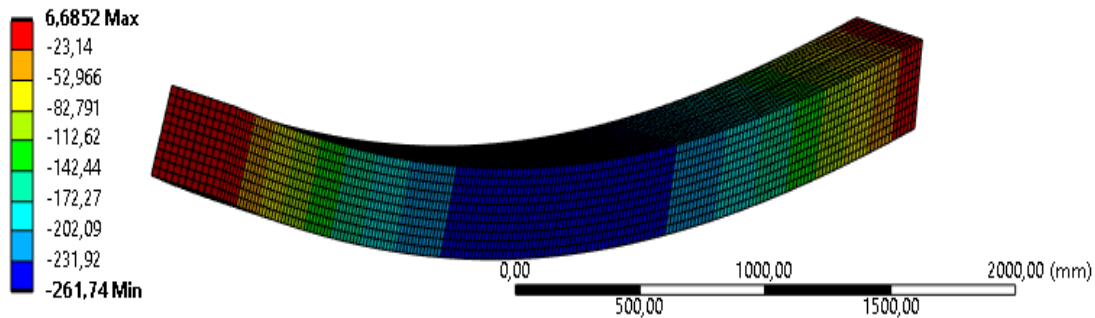


Рисунок 4 – Прогин (мм) залізобетонної балки перерізом 300мм x 600 мм на 139,15 хвилині вогневого впливу

Крім того, було досліджено зміни напружень у бетоні досліджуваної залізобетонної балки за умови дії теплового впливу пожежі за стандартним температурним режимом пожежі із врахуванням діючого механічного навантаження, що дозволило відтворити реальні умови роботи конструкції при пожежі.

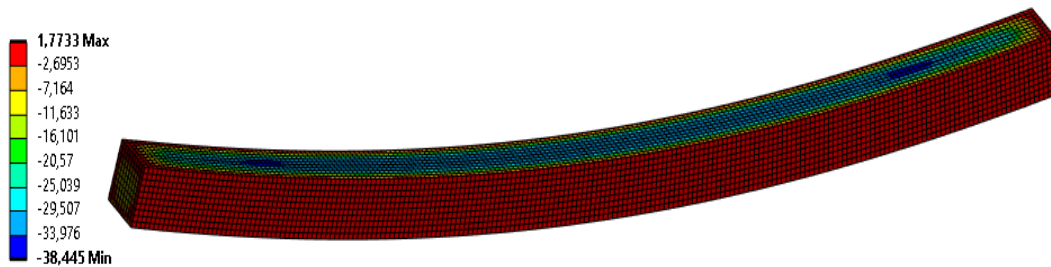


Рисунок 5 – Максимальні напруження у бетоні залізобетонної балки на 139,15 хвилині впливу пожежі

Розподіл температури по досліджуваній залізобетонній балці на момент втрати несучої здатності приведений на рис. 6.

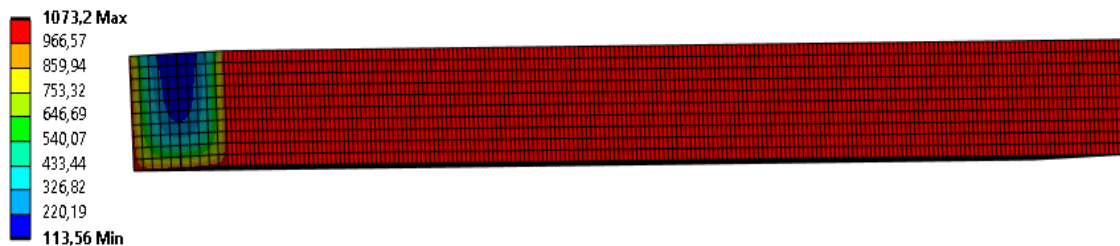


Рисунок 6. Розподіл температури на 139,15 хвилині вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі по перерізу залізобетонної балки

За результатами розрахунку уточненого методу оцінки вогнестійкості залізобетонної балки із одиночним двоярдним армуванням встановлено, що межа вогнестійкості складає 139,15 хв, максимальна температура на момент настання граничного стану з вогнестійкості з втрати несучої здатності складає 1073,2 °С, максимальні напруження спостерігаються в стиснутій зоні бетону і складають 38,445 МПа.

**Висновки:**

1. За результатами перевірки відповідності класу вогнестійкості залізобетонної балки за допомогою табличного методу встановлено, що недостатність відстані до вісі арматури першого ряду 5 мм не надає можливість відповідати досліджуваній конструкції класу вогнестійкості R120.

2. Несуча здатність досліджуваної конструкції при пожежі терміном 120 хв ( $M_{Rd,fi}=96,6$  кНм) більша за діюче навантаження при пожежі ( $M_{Ed,fi}=91,5$  кНм). Умова міцності при пожежі виконується, тобто за зонним методом встановлено, що залізобетонна балка відповідає класу вогнестійкості R 120, однак межа відповідності несучої спроможності конструкції наближаються до рівня діючого навантаження, при тому дана залізобетонна балка навантажена на 50% від руйнівного показника.

3. У графічному модулі для проведення обчислювального експерименту за допомогою методу кінцевих елементів побудована геометрична модель залізобетонної балки з прямокутним перерізом, із одиночним дворядним армуванням за геометричними параметрами, що відповідає досліджуваній конструкції.

4. З метою реалізації уточненого розрахунку з оцінку вогнестійкості створена кінцево-елемента сітка, для розв'язання тепломеханічної задачі щодо визначення межі вогнестійкості залізобетонної балки з прямокутним перерізом, із одиночним дворядним армуванням.

5. За допомогою методу кінцевих елементів проведений уточнений розрахунок з оцінки вогнестійкості залізобетонної балки з прямокутним перерізом, із одиночним дворядним армуванням, за результатами отриманих результатів встановлено, що межа вогнестійкості складає 139,15 хв, при тому максимальні напруження спостерігаються в стиснутій зоні бетону і складають 38,445 МПа.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. ДСТУ 8828:2019 ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА Загальні положення.
2. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: Держбуд України, 2016. – 87с.;
3. Захист від пожежі. Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. ДСТУ Б В.1.1-18:2007 [Чинний від 2008-04-01.] – Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки (УкрНДІПБ) МНС України – 2007. – 10 с – (Державний Стандарт України).
4. ДСТУ Б.В.1.1-4-98\*. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. – К.: Держбуд України, 1999. – 45с.;
5. Поздеев С. В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних балок. / Поздеев С. В. // Пожежна безпека : [зб. наук. праць]. – Л.: ЛДУБЖД. – № 17. – 2010. – С. 115–122.
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. ДСТУ-Н Б В.2.6-196:2014 Настанова з проектування залізобетонних балок. Розрахунок на вогнестійкість. [Чинний від 2015-07-01.] – К.: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2014. – 45 с – (Національний стандарт України).
8. Фомін С. Л. Вогнестійкість та залишкова міцність залізобетонних конструкцій / Фомін С. Л. // Матеріали першої всеукраїнської науково-технічної конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону». – К.: 1996. – С. 183-185.
9. Павліков А. М. Залізобетонні конструкції в умовах складного деформування та їх розрахунок: навчальний посібник / А. М. Павліков, О. В. Гарькава. – Полтава : ПолтНТУ, 2018. – 130 с.
10. Поздеев С.В. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. / Поздеев С.В., Левченко А.Д. // Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка». – Львів: НТУ «Львівська політехніка». – 2011. – С. 264 – 269.

## REFERENCE

1. DSTU 8828:2019 FIRE SAFETY General provisions.
2. DBN V.1.1-7:2016. Fire safety of construction sites. – K.: Derzhbud of Ukraine, 2016. – 87 p.;
3. Fire protection. Buildings and fragments of buildings. The method of natural fire tests. General requirements. DSTU B V.1.1-18:2007 [Effective from 2008-04-01.] – Ukrainian Research Institute of Fire Safety (UkrNDIPB) of the Ministry of Emergencies of Ukraine – 2007. – 10 p. – (State Standard of Ukraine).
4. DSTU B.V.1.1-4-98\*. Building structures. Fire resistance test methods. – K.: Derzhbud of Ukraine, 1999. – 45 p.;
5. Pozdeev 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. Pozdeev // Fire safety: [Coll. of science works]. – L.: LDUBZHD. – No. 17. – 2010. – P. 115–122.
6. DSTU-NB EN 1992-1-2:2012 Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures. Part 1-2. Terms. Calculation of structures for fire resistance (EN 1992-1-2:2004, IDT);
7. DSTU-N B V.2.6-196:2014 Guidelines for the design of reinforced concrete beams. Calculation of fire resistance. [Effective from 2015-07-01.] – K.: SE "State Research Institute of Building Structures" (NDIBK), 2014. – 45 p. – (National Standard of Ukraine).
8. Fomin S. L. Fire resistance and residual strength of reinforced concrete structures / Fomin S. L. // Materials of the first All-Ukrainian scientific and technical conference "Scientific and practical problems of modern reinforced concrete". – K.: 1996. – P. 183-185.
9. Pavlikov A.M. Reinforced concrete structures in conditions of complex deformation and their calculation: study guide / A.M. Pavlikov, O.V. Harkava – Poltava: PoltNTU, 2018. – 130 p.
10. Pozdieiev S.V. Development of a refined calculation method for determining the limit of fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures. / Pozdeev S.V., Levchenko A.D. // Scientific Bulletin of the National Technical University "Lviv Polytechnic". – Lviv: NTU "Lviv Polytechnic". – 2011. – P. 264 – 269.

*Serhii POZDIEIEV, Doctor of Technical Sciences, Professor (ORCID: 0000-0002-9085-0513),*

*Andriy BEREZOVSKIY, PhD in technical sciences, Associate Professor*

*(ORCID: 0000-0002-4043-1206),*

*Iryna RUDESHKO (ORCID: 0000-0003-3294-2214),*

*Tetiana KOSTENKO, Doctor of Technical Sciences, Professor (ORCID: 0000-0001-9426-8320),*

*Stanislav SIDNEI, PhD in technical sciences (ORCID: 0000-0002-7664-6620)*

*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes  
of National University of Civil Protection of Ukraine*

## STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE HIERARCHICAL APPROACH TO CALCULATED ASSESSMENT OF THE FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS ACCORDING TO EUROCODE 2

**Abstract.** *The paper presents the main calculation methods for assessing the fire resistance according to tabular, zone and refined methods of reinforced concrete beams with a rectangular cross-section, with single double-row reinforcement, which is recommended in Eurocode 2. Based on the results of the computational experiments, a comparative analysis of the fire resistance indicators of these structures was carried out. The level of load on the reinforced concrete beam was taken to be 50% of the bearing capacity.*

*The finite element method was used for the refined calculation of the fire resistance assessment. According to the results of the refined method, the limit of fire resistance of the studied structure was 139.15 minutes.*

**Keywords:** *reinforced concrete floor beam, calculation methods of fire resistance assessment, finite element model, standard fire temperature regime.*