

УДК 624.012

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102>

Станіслав Сідней, канд. техн. наук (ORCID: 0000-0002-7664-6620)

Василь Кобко, канд. іст. наук, доцент (ORCID: 0000-0002-5202-3285)

Світлана Федченко (ORCID: 0000-0003-3294-2214)

Микола Змага (ORCID: 0000-0003-3601-292X)

Наталія Зайка (ORCID: 0000-0002-8757-5709)

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗОННОГО МЕТОДУ ПЕРЕВІРКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ПУСТОТНОЇ ПЛИТИ

У роботі проведено аналіз існуючих методів, що використовуються для визначення показників вогнестійкості пустотних залізобетонних плит.

Проведено чисельні експерименти, використовуючи теплові математичні моделі пустотних залізобетонних плит в умовах пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв. Робота цих моделей ґрунтується на основі нестационарного диференціального рівняння теплопровідності з чисельною апроксимацією за допомогою методу кінцевих елементів. За результатами проведених чисельних експериментів була визначена несуча здатність збірної залізобетонної плити при впливі пожежі за тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв. Обчислення проводились із використанням запропонованого спрощеного зонного методу і зонного методу, що рекомендується Єврокодом 2.

Таким чином, за результатами проведених досліджень розроблено спрощену методичку перевірки показників вогнестійкості пустотних залізобетонних плит. Метод, що пропонується, заснований на визначенні пошкодженого шару бетону в центрах зон половини перерізу пустотних залізобетонних плит, також враховується тепловий вплив від пожежі на механічні характеристики сталевих стрижнів арматури.

За результатами порівняльного аналізу існуючого та запропонованого способу встановлено, що похибка не перевищує 6 % при впливі пожежі тривалістю 90 хв, що демонструє високу ефективність у використанні запропонованого способу і можливість його застосування для проведення розрахунків вогнестійкості пустотних залізобетонних плит.

Ключові слова: *пустотна залізобетонна плита, зонний метод, клас вогнестійкості, вогневі випробування.*

Постановка проблеми. Основні типи перекриттів у будівлях виготовляються із залізобетону. Безперечно цей матеріал займає перше місце в порівнянні з іншими матеріалами. Аналізуючи такі критерії, як складність монтажу, несучу здатність, швидкість виготовлення, обслуговування і, звичайно ж, вартість серед залізобетонних типів плит перекриття, пустотні залізобетонні плити розташовуються на лідируючих позиціях.

Однією з найголовніших завдань для забезпечення необхідного рівня пожежної безпеки при проведенні проектування різних будівель та споруд є застосування будівельних конструкцій із відповідними класами вогнестійкості [1, 2]. Таким чином, будівельні конструкції, що відповідають необхідним класам вогнестійкості, дають можливість гарантувати безпечну евакуацію людей при виникненні пожежі. При цьому аварійно-рятувальні підрозділи отримують можливість, для проведення спеціальних робіт з локалізації та ліквідації пожежі протягом певного часу. Отримання показників вогнестійкості будівельних конструкцій передбачається декількома способами [2, 3].

Безумовно достовірні дані можливо отримати при проведенні натурних вогневих випробувань [4, 5]. Однак даний метод є дороговартісним та масштабним. Тому крім цього

способу існують: експериментальний метод, який полягає у відтворенні зразка досліджуваної конструкції, що піддається вогневим випробуванням у спеціальних лабораторіях та розрахунковий метод перевірки відповідності класам вогнестійкості будівельних конструкцій [6, 7]. Ці розрахункові методи передбачають вибір сценарію розвитку пожежі та можливість підбору необхідної моделі для розрахунку температурного впливу на конструкцію [6, 7]. Виконання задач, пов'язаних з проведенням обчислювальних експериментів, представлені в дослідницьких роботах багатьох фахівців та експертів [8, 9]. Переваги таких підходів щодо вирішення задач з вогнестійкості пов'язані з можливостями використання абсолютно різних матеріалів, геометричних характеристик, і при цьому проведення обчислювальних експериментів значно менш затратні та трудомісткі порівняно з випробуваннями у спеціальних вогневих печах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує кілька видів розрахункових методів перевірки класів вогнестійкості: табличний, спрощений і уточнений [10, 11]. Завдяки отриманим даним в результаті проведених чисельних вогневих випробувань на території всього світу, сформовані відповідні таблиці [7], за якими проводиться перевірка вогнестійкості конструкцій. Однією з основних переваг табличного методу над зонним є можливість перевірки вогнестійкості за різними типами перерізів залізобетонних плит. Однак отримані дані мають значний запас і не дають можливості визначити більш достовірні показники вогнестійкості на відміну від зонного методу. Зонний метод дозволяє визначати температуру в перерізі залізобетонних плит за допомогою температурних номограм з високою точністю [7]. Відповідно, отримані результати розподілу температури у перерізі конструкції ми можемо використовувати для визначення механічних властивостей конструкцій. Відкидаючи пошкоджений шар бетону, а також враховуючи зниження міцності арматури від теплового впливу пожежі, залізобетонні плити розглядаються за нормальних умов. Незважаючи на високу точність отриманих показників вогнестійкості за допомогою зонного методу, цей спосіб має недолік, пов'язаний з обмеженням використання номограм температур, а саме висота перерізу повинна бути тільки 200 мм.

Виконання розрахунків за допомогою уточненого методу [7, 12] передбачає універсальний теоретичний підхід, заснований на використанні диференціального нестационарного рівняння теплопровідності, однак для реалізації такого методу необхідно задіяти спеціалізовані програмні комплекси, що потребує певних ресурсів обчислювальних пристроїв.

Відповідно, дослідження проведення оцінки вогнестійкості пустотних залізобетонних плит є актуальним.

Постановка завдання. Метою роботи є удосконалення існуючої методики перевірки або визначення показників вогнестійкості пустотних залізобетонних плит. Для реалізації зазначеної мети поставлено наступні завдання:

1. Побудувати теплові математичні моделі, застосовуючи методику [6, 7, 12] для визначення розподілу температури у перерізі пустотної залізобетонної плити при пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв.
2. Визначити несучу здатність досліджуваної пустотної залізобетонної плити під час пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв., застосовуючи методику зонного методу [7, 12].
3. Визначити несучу здатність досліджуваної пустотної залізобетонної плити при пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв, розділивши половину перерізу на п'ять рівних зон.
4. Проаналізувати результати обчислювальних експериментів з подальшою можливістю удосконалити існуючу методику перевірки показників вогнестійкості пустотних залізобетонних плит.

Викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Конструктивна схема перерізу досліджуваної пустотної залізобетонної плити представлена на рис. 1.

Застосовуючи методику [6, 7] побудовано теплові математичні моделі. Дані моделі надають можливість отримати відомості щодо розподілу температури у перерізі досліджуваної пустотної залізобетонної плити. Тривалість пожежі було прийнято 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв відповідно. Кінцевоелементна сіточна модель зображена на рис. 2.

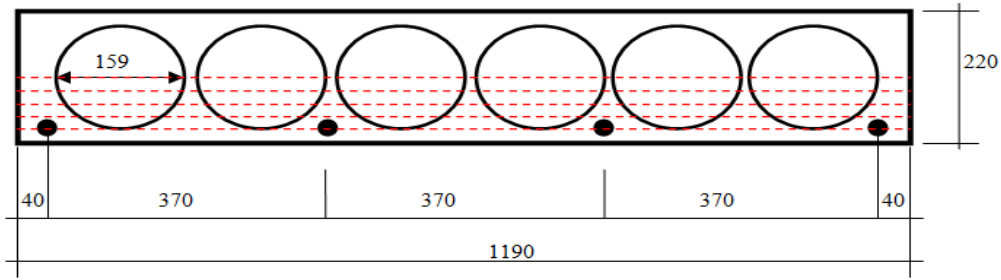


Рисунок 1 – Конструктивна схема перерізу досліджуваної пустотної залізобетонної плити.

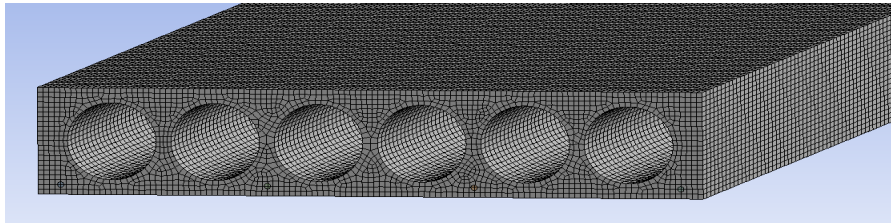
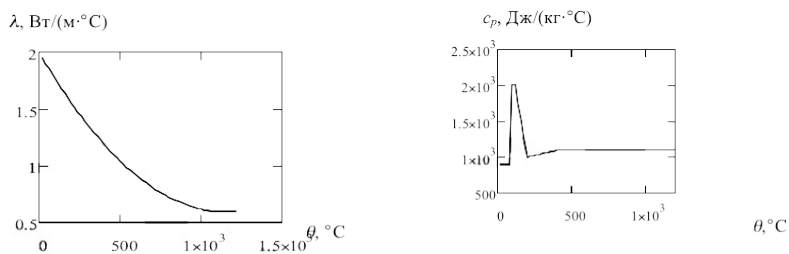


Рисунок 2 – Кінцеелементна сіткова модель досліджуваної пустотної залізобетонної плити.

З метою отримання найбільш точних даних при виконанні розрахунків, геометричні параметри досліджуваної плити побудовані відповідно до реальних розмірів [13, 14]. Матеріали конструкції виконані з бетону класу С30/35, арматурні стрижні в нижній частині плити зі сталі класу А250.

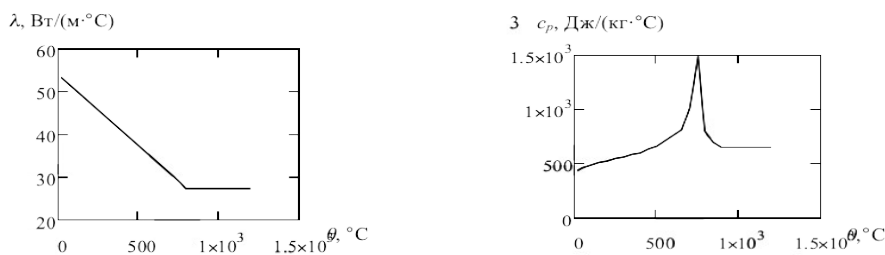
При проведенні обчислювальних експериментів використовувались теплофізичні характеристики бетону та сталі, залежні від температури [7]. Температурні залежності даних показників представлені на рис. 3, 4. Також при проведенні розрахунків враховані необхідні механічні властивості бетону та сталі.



а.

б.

Рисунок 3 – Теплофізичні характеристики бетону С35 (теплопровідність – а, теплоємність – б).



а.

б.

Рисунок 4 – Теплофізичні характеристики сталі С250 (теплопровідність – а, теплоємність – б).

З метою отримання показників розподілу температури у перерізі досліджуваної конструкції від пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв задані необхідні граничні умови, які представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри граничних умов.

Характеристика	Одиниці виміру	Величина	Джерело
Параметри граничних умов теплотехнічної задачі			
Номінальний тепловий вплив		$345 \lg(8t+1)+20$	
Постійна Стефана-Больцмана	Вт/(м ² ·К ⁴)	$5.67 \cdot 10^{-8}$	[6,7]
Ступінь чорноти	-	0.7	[6,7]
Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні, що обігривається	Вт/(м ² ·К)	25	[6,7]
Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні, що не обігривається	Вт/(м ² ·К)	9	[6,7]

Результати проведених обчислювальних експериментів представлені у табл. 2, 3 та на рис. 5. При вирішенні механічної частини задачі спочатку використовувався зонний метод [7, 10]. Використання даного методу передбачає відокремлення шару бетону від перерізу конструкції, що деградує внаслідок теплового впливу пожежі та який не здатний чинити опір механічному навантаженню.

Таблиця 2 – Температурні показники у 5 зонах всього перерізу пустотної залізобетонної плити та в арматурних стрижнях при пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв.

Висота перерізу плити (мм)	44	88	132	176	200	$\theta_{m,s}$ (°C) в арматурних стрижнях	
	Середня температура (°C) при застосуванні зонного методу						
Тривалість пожежі (хв)	30	212,2	148,8	140,1	130,3	122,1	265,2
	45	277,6	190,7	165,6	149,5	137,4	342,66
	60	315,2	251,15	213	174,5	152,2	500,8
	90	367,4	283,05	237,8	194,9	178,8	573,06

Також використовувався метод, що пропонується для перевірки класу вогнестійкості, результати якого відображені в табл. 3.

Таблиця 3 – Температурні показники у 5 зонах половини перерізу пустотної залізобетонної плити та в арматурних стрижнях при пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв.

Товщина перерізу конструкції (мм)	11	33	55	77	99	$\theta_{m,s}$ (°C) в арматурних стрижнях	
	Середня температура (°C) при застосуванні спрощеного зонного методу, що пропонується						
Тривалість пожежі (хв)	30	445,2	262,7	197,9	169,3	123,3	265,2
	45	521,1	332,3	251,7	211,6	137	342,66
	60	552,3	375,8	297	242,7	251,15	500,8
	90	590,8	413,9	339	306,3	275,9	573,06

Температурні показники у перерізі та в арматурних стрижнях досліджуваної пустотної залізобетонної плити при пожежі зображені на рис. 5

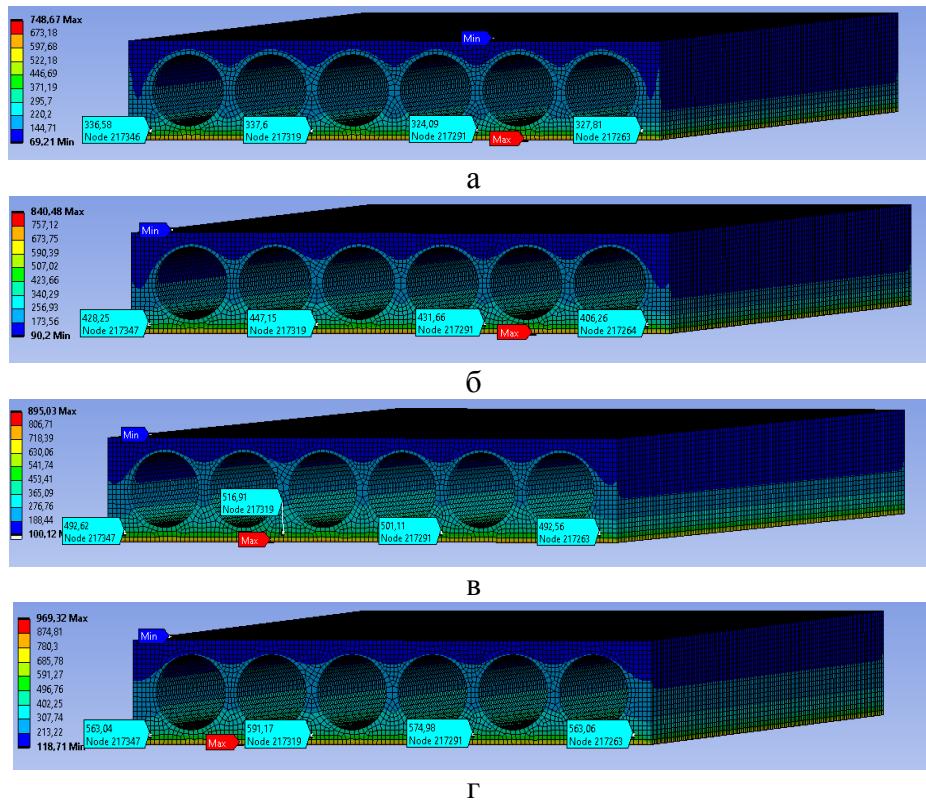


Рисунок 5 – Температурні показники у перерізі та в арматурних стрижнях досліджуваної пустотної залізобетонної плити при пожежі (а – 30 хв, б – 45 хв, в – 60 хв, г – 90 хв).

Результати проведених механічних розрахунків на несучу здатність, отримані у результаті використання зонного методу і запропонованої методики, представлені в таблиці 4.

Спосіб, що пропонується, ґрунтується на проведенні наступних процедур.

1. Половину товщини плити було поділено на п'ять однакових зон за висотою (рис. 1), що становить по 22 мм кожна. Тому середини кожної зони розташовані на висоті перерізу 11 мм, 33 мм, 55 мм, 77 мм та 99 мм. Відповідно в центрі кожної зони використовуючи спосіб [9] визначено температурні показники при дії пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв. Результати проведених обчислювальних експериментів показано у табл. 3.

2. Визначається відповідний коефіцієнт $k_c(\theta_i)$ зниження міцності бетону при стисканні для кожної зони за діаграмою "напруження-деформація" для бетону при підвищених температурах [7].

3. Розраховується усереднений коефіцієнт зниження механічних параметрів бетону під час стискання за формулою [7]:

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

де n – кількість паралельних зон за висотою перерізу.

4. Обчислення пошкодженої зони бетону a_z у пустотній залізобетонній плиті виконували за формулою:

$$a_z = w \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right], \quad (2)$$

де $k_c(\theta_M)$ – коефіцієнт зниження міцності бетону у центрі перерізу всієї плити;

W – половина товщини плити.

5. Визначення коефіцієнтів зміни механічних властивостей арматури виконується за температурними залежностями [7].

Враховуючи ці коефіцієнти, переходимо до проведення розрахунків пустотної залізобетонної плити, що досліджується вже за нормальних умов, не враховуючи пошкодженого шару бетону.

Таблиця – 4 Показники несучої здатності пустотної залізобетонної плити під час пожежі $M_{Rd,fb}$ (кНм)

Тривалість пожежі (хв)	Зонний метод (кНм)	Методика, що пропонується (кНм)	Похибка
30	16,4	16,2	1,2 %
45	15,5	15,1	2,5 %
60	8,26	7,933	3,9 %
90	5,1	4,795	5,98%

На підставі проведених розрахунків визначено несучу здатність пустотної залізобетонної плити при пожежі з тривалістю теплового впливу пожежі 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв. Дані результати представлені у табл. 4. Аналізуючи отримані результати, спостерігається найбільша похибка в отриманих показниках при дії пожежі на протязі 90 хв. та становить 5,98 %. Таким чином, допускається використання запропонованої методики перевірки вогнестійкості пустотних залізобетонних плит, що істотно спрощує проведення таких розрахунків, і не впливає на точність отриманих результатів.

Висновки. Для реалізації поставленого завдання було розроблено та побудовано теплові математичні моделі пустотних залізобетонних плит в умовах пожежі тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв. Дані моделі функціонують на основі нестационарного диференціального рівняння теплопровідності з чисельною апроксимацією за допомогою методу кінцевих елементів. Під час проведення досліджень розроблено спрощену методику перевірки показників вогнестійкості пустотних залізобетонних плит. За результатами проведених чисельних експериментів була визначена несуча здатність пустотної залізобетонної плити, при впливу пожежі за тривалістю 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв. Використовувався зонний метод, що рекомендується стандартами [8, 10], та запропонований спрощений зонний метод.

За результатами аналізу встановлено, що показники розрахунків існуючим та запропонованим методом відрізняються не більше ніж на 6 %, що демонструє високу ефективність у використанні способу, що пропонується, та можливість його застосування для проведення розрахунків вогнестійкості пустотних залізобетонних плит.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. EN 13501 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.
2. ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги». Міністерство регіонального розвитку та будівництва – 2017. – 35 с.
3. V.M. Roitman, Engineering solutions for assessing the fire resistance of projected and reconstructed buildings (M.: Fire safety and science, 2001).
4. R. P. Johnson, Y. C. Wang, Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings (2019).

5. T. Shnal, S. Pozdieiev, R. Yakovchuk, O. Nekora, Development of a Mathematical Model of Fire Spreading in a Three-Storey Building Under Full-Scale Fire-Response Tests (Lecture Notes in Civil Engineering, 2021), 100 LNCE, pp. 419–428.

6. EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

7. EN 1992-1-2 (2004) Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].

8. Dao Duy Kien; Do Van Trinh; Khong Trong Toan; Le Ba Danh, Fire Resistance Evaluation of Reinforced Concrete Structures (5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 2020).

9. T. Shnal, S. Pozdieiev, O. Nuianzin, S. Sidnei, Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions (Materials Science Forum, 2020), 1006, pp. 107 – 116.

10. T. Lennon, D.B. Moore, Y.K. Wang, K.G. Bailey, Designer's Guide to EN 1991-1-2: 2002, EN 1992-1-2: 2002, EN 1993-1-2: 2002 and EN 1994-1-2: 2002: Guidelines for the design of fire protection for steel, reinforced concrete and concrete structures of buildings and structures in accordance with the Eurocodes: per. from English (Moscow, 2013).

11. Sanin Dzidic, FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLABS ACCORDING TO EC2 AND BRANZ TR8TY, (Conference: 13th Scientific Conference with International Participation "Contemporary Theory and Practice in Construction. Banja Luka, Bosnia and Herzegovina. 25.05. 2018), Volume: Book of Proceedings, ISSN 2566-4484.

12. Emidio Nigro, Giuseppe Cefarelli, Antonio Bilotta, Gaetano Manfredi, Edoardo Cosenza, Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part II: Experimental results and numerical simulations on the thermal field (Composites Part B: Engineering, 2011), 42 (6), pp. 1751-1763.

13. O. Vassart, B. Zhao, L.G. Cajot, F. Robert, U. Meyer, A. Frangi, Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design. JRC Science and Policy Report (Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014).

14. Concrete Reinforcing Steel Institute - CRSI [2015]. "Fire Resistance of Reinforced Concrete Buildings", CRSI Technical Note ETN-B-1-16, (Schaumburg, Illinois, 2015).

REFERENCES

1. EN 13501 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.

2. Fire safety of construction objects. General requirements of State Construction norms B.1.1-7-2016 [Effective from 2017-06-01.] (The Ministry of Regional Development and Construction, 2017).

3. V.M. Roitman, Engineering solutions for assessing the fire resistance of projected and reconstructed buildings (M.: Fire safety and science, 2001).

4. R. P. Johnson, Y. C. Wang, Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings (2019).

5. T. Shnal, S. Pozdieiev, R. Yakovchuk, O. Nekora, Development of a Mathematical Model of Fire Spreading in a Three-Storey Building Under Full-Scale Fire-Response Tests (Lecture Notes in Civil Engineering, 2021), 100 LNCE, pp. 419–428.

6. EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

7. EN 1992-1-2 (2004) Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].

8. Dao Duy Kien; Do Van Trinh; Khong Trong Toan; Le Ba Danh, Fire Resistance Evaluation of Reinforced Concrete Structures (5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 2020).
9. T. Shnal, S. Pozdieiev, O. Nuianzin, S. Sidnei, Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions (Materials Science Forum, 2020), 1006, pp. 107 – 116.
10. T. Lennon, D.B. Moore, Y.K. Wang, K.G. Bailey, Designer's Guide to EN 1991-1-2: 2002, EN 1992-1-2: 2002, EN 1993-1-2: 2002 and EN 1994-1-2: 2002: Guidelines for the design of fire protection for steel, reinforced concrete and concrete structures of buildings and structures in accordance with the Eurocodes: per. from English (Moscow, 2013).
11. Sanin Dzidic, FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLABS ACCORDING TO EC2 AND BRANZ TR8TY, (Conference: 13th Scientific Conference with International Participation "Contemporary Theory and Practice in Construction. Banja Luka, Bosnia and Herzegovina. 25.05. 2018), Volume: Book of Proceedings, ISSN 2566-4484.
12. Emidio Nigro, Giuseppe Cefarelli, Antonio Bilotta, Gaetano Manfredi, Edoardo Cosenza, Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part II: Experimental results and numerical simulations on the thermal field (Composites Part B: Engineering, 2011), 42 (6), pp. 1751-1763.
13. O. Vassart, B. Zhao, L.G. Cajot, F. Robert, U. Meyer, A. Frangi, Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design. JRC Science and Policy Report (Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014).
14. Concrete Reinforcing Steel Institute - CRSI [2015]. "Fire Resistance of Reinforced Concrete Buildings", CRSI Technical Note ETN-B-1-16, (Schaumburg, Illinois, 2015).

*Stanislav Sidnei, PhD in technical sciences,
Vasyl Kobko, PhD in historical sciences, docent,
Svitlana Fedchenko,
Mykola Zmaga,
Nataliia Zaika,*

Cherkasy Institute of Fire Safety Named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine

IMPROVEMENT OF THE ZONE METHOD OF CHECKING THE FIRE RESISTANCE OF A HOLLOW-CORE SLAB

The work analyzes the existing methods used to determine the fire resistance of hollow-core reinforced concrete slabs. There were carried out numerical experiments using thermal mathematical models of hollow-core reinforced concrete slabs under conditions of fire with duration of 30 minutes, 45 minutes, 60 minutes, and 90 minutes. The functioning of these models is based on the non-stationary differential equation of thermal conductivity with numerical approximation using the finite element method. Based on the results of the numerical experiments, the load-bearing capacity of the sectional reinforced concrete slab was determined with duration of fire exposure of 30 minutes, 45 minutes, 60 minutes, and 90 minutes, according to the proposed simplified zone method and the zone method recommended by the standards. Thus, during the research there was developed a simplified method for checking the fire resistance of hollow-core reinforced concrete slabs. The proposed method is based on determining the damaged layer of concrete in the centers of the half-section zones of hollow-core reinforced concrete slabs, as well as taking into account the thermal influence of a fire on the strength characteristics of steel reinforcement bars. According to the results of a comparative analysis of the existing and proposed method, it was established that the error does not exceed 6% with a fire exposure lasting 90 minutes, which demonstrates high efficiency in using the proposed method and the possibility of its application for calculating the fire resistance of hollow-core reinforced concrete slabs.

Key words: hollow-core reinforced concrete slab, zone method, fire resistance class, fire tests.