

УДК 624.012

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-83-88>

Станіслав Сідней, канд. техн. наук (ORCID: 0000-0002-7664-6620)
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ У ПЛОСКИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТАХ ПРИ ПОЖЕЖІ

У роботі представлені та проаналізовані методи, за допомогою яких можливо визначити розподіл температури при впливі на будівельні конструкції стандартного температурного режиму пожежі.

Для реалізації достовірних обчислювальних експериментів було розроблено математичні моделі залізобетонних плит з описом та температурним реагуванням на підвищення температури від стандартного температурного режиму пожежі з урахуванням рівнянь теплопровідності при їх чисельному виконанні на основі методу скінченних елементів. Обчислення даних математичних моделей виконувалось із застосуванням інструментів обчислювальної термогазодинаміки, що описують процес тепло- та масообміну в вогневих випробувальних печах при проведенні оцінки вогнестійкості залізобетонних плит.

За результатами обчислювального експерименту представлено, що показники поширення температури у перерізі плоскої залізобетонної плити досить достовірні порівняно з температурними номограмами, рекомендованими Єврокодом 2. На основі отриманих даних та закономірностей розроблено методику визначення показників розподілу температури в перерізах плоских залізобетонних плит, що є підставою для проведення розрахунків з оцінки межі вогнестійкості даних будівельних конструкцій.

Ключові слова: плоска залізобетонна плита, "стандартний температурний режим пожежі", теплоємність, теплопровідність.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день залізобетон є одним з найбільш використовуваних будівельних матеріалів у будівництві. Конструкції цього матеріалу відрізняються високою міцністю і підходять практично під будь-які проектні рішення. Будівельні елементи будівель і споруд із залізобетону, в порівнянні зі сталевими конструкціями, мають високу пожежостійкість.

Однією із надважливих задач щодо забезпечення необхідного рівня пожежної безпеки при будівництві та експлуатації будівель є застосування будівельних конструкцій з класами вогнестійкості, що відповідають ступеню вогнестійкості будівлі. Визначення достовірної фактичної межі вогнестійкості конструкції проводиться у тому числі на підставі розподілу температури у перерізі конструкції.

Найбільш надійний та достовірний метод визначення показників розподілу температури у перерізах будівельних елементів передбачається при проведенні натурних вогневих випробувань [1, 2]. Альтернативою цього способу є застосування розрахункових методів [1, 3].

Враховуючи, що визначення розподілу температури у перерізі конструкції є одним із головних параметрів при оцінюванні вогнестійкості конструкції, необхідність проведення дослідження по даному напрямку у перерізах залізобетонних плоских плит є актуальним.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Існуюча нормативна документація та роботи багатьох вчених, які вивчають, поведінку залізобетонних конструкцій за умов теплового впливу від пожежі представили безліч методів, що описують роботу цих конструкцій за цих умов [4, 5]. При уточненому способі вирішення теплової задачі застосовується загальний теоретичний метод, що ґрунтується на використанні диференціального нестационарного рівняння теплопровідності [6, 7]. Даний спосіб дає можливість врахувати всю різноманітність матеріалів, також він є значно менш вартісний та трудомісткий у порівнянні з натурними випробуваннями, проте єдиної універсальної методики на сьогоднішній день не представлено.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. В даний час теоретична та методична база розрахункових методів містяться в серії нормативних документів [7, 8], що діють в Україні. При цьому використання спрощеного методу розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій є достатньо обмеженим через геометричний ліміт, щодо висоти перерізу, а саме, визначення розподілу температури у перерізах залізобетонних плит або стін передбачається лише товщиною перерізу лише 200 мм [7].

У свою чергу забезпечення необхідного класу вогнестійкості будівельних конструкцій є необхідним для забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд в цілому.

Відповідно визначення показників розподілу температури при впливі теплових впливів від пожежі в перерізах зазначених будівельних конструкцій зумовлює вирішення завдань, пов'язаних з вогнестійкістю будівель та споруд.

Основним завданням роботи було розробити методика визначення розподілу температури у перерізі залізобетонної плити за стандартним температурним режимом пожежі з подальшою можливістю використання даних теплових показників для проведення оцінки вогнестійкості залізобетонних плит з будь-яким перерізом за спрощеним методом, рекомендованим Єврокодом 2 [7].

Постановка задачі та її розв'язання. Для опису поведінки залізобетонних плит під час пожежі було проаналізовано підходи до вирішення подібних завдань [9, 10]. Аналіз підходів та методів у даних джерелах дозволив визначити основні передумови та припущення, які можна сформулювати у такому загальному вигляді:

1. Створити теплові математичні моделі, що функціонують на основі нестационарного двовимірного квазілінійного рівняння теплопровідності з ефективними теплофізичними характеристиками (ТФК) бетону та сталі згідно з нормативними документами [6, 7].

2. Проаналізувати отримані результати математичних моделей щодо розподілу температури у перерізі плоскої залізобетонної плити за умовою впливу стандартного температурного режиму пожежі.

3. Провести порівняння показників температури, отриманих у результаті розв'язання математичних моделей диференціального нестационарного рівняння теплопровідності у перерізах залізобетонної плоскої плити з показниками розподілу температури відповідно до номограми Єврокоду 2 [7].

4. На основі одержаних результатів розробити методика визначення показників розподілу температури у перерізах залізобетонних плит різної висоти перерізу за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ).

Закріплення досліджуваної конструкції виконано шарнірно на коротких сторонах плити, рівномірно розподілене навантаження становить 15 кН/м^2 , що представлено на схемі (рис. 1).

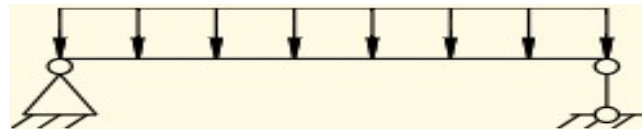


Рисунок 1 – Статична схема закріплення та механічного навантаження плоскої залізобетонної плити.

Основні геометричні параметри залізобетонної плити, що досліджуються, представлені на рис. 2.

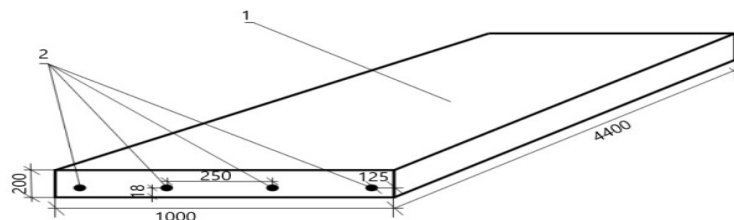
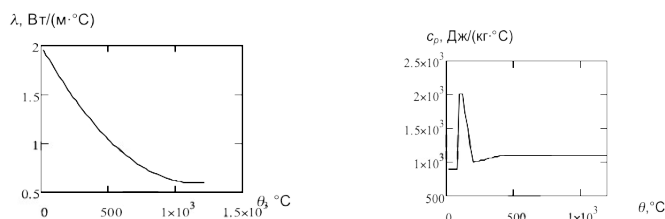


Рисунок 2 Основні геометричні параметри плоскої залізобетонної плити, що досліджується. (1-залізобетонна плита, 2-арматурні стрижні діаметром 16 мм).

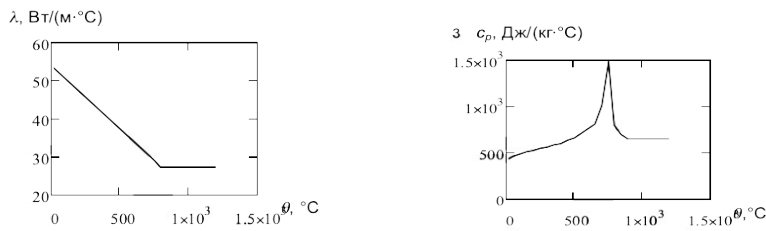
Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Для отримання результатів розрахунку математичної моделі визначений комплекс вихідних даних, до яких належать властивості матеріалів конструкцій та параметри граничних умов, що враховують прикладені механічне та теплове навантаження. Теплофізичні властивості бетону С35 і сталі С250\, з яких виготовлена плоска залізобетонна плита, представлені відповідно на рис. 3, 4. Дані характеристики – це температурні залежності ефективних характеристик, описані [7].



а.

б.

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



а.

б.

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

Для розрахунку були використані математичні моделі, параметри яких представлені в табл. 1.

Під час проведення теплових розрахунків досліджуваної конструкції було враховано вплив підвищених температур від пожежі з одного боку відповідно [10].

Таблиця 1 – Основні математичні моделі, що використовувались для розрахунків розподілу температури у перерізах залізобетонних плит при дії стандартного температурного режиму пожежі

Особливість поведінки матеріалу	Використана математична модель (метод)	Джерело
Теплотехнічне завдання		
Теплопровідність	Рівняння нестационарної теплопровідності разом із МСЕ	[8, 10]
Граничні умови	III роду	
Фізична нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона	[3]

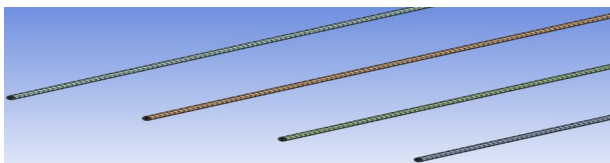
Для завдання граничних умов були використані параметри, спираючись на чинні стандарти України [7] щодо розрахунку будівельних конструкцій на вогнестійкість. Величини вибраних параметрів наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри граничних умов

Характеристика	Одиниця виміру	Величина	Джерело
Параметри граничних умов теплотехнічного завдання			
Номінальний тепловий вплив	Стандартний температурний режим пожежі		
Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні, що обігривається	Вт/(м ² ·К)	25	[10]
Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхнях, що не обігриваються	Вт/(м ² ·К)	9	[10]
Ступінь чорноти	-	0.7	[10]
Постійна Стефана-Больцмана	Вт/(м ² ·К ⁴)	5.67·10 ⁻⁸	[10]

Для розрахунку була побудована сіткова модель конструкції, вид якої представлений на рис. 5.

Для отримання найбільш достовірної візуалізації поведінки плоскої залізобетонної плити при дії стандартного температурного режиму від пожежі [6] конструкція розглядалась в повних розмірах.



а.

б.

Рисунок 5. Сіткова модель теплотехнічної задачі (а – плоска залізобетонна плита, б – арматура).

В результаті розв'язання теплового завдання отримано показники розподілу температури, на рис. 6 наведено результати впливу стандартного температурного режиму пожежі після 1 години.

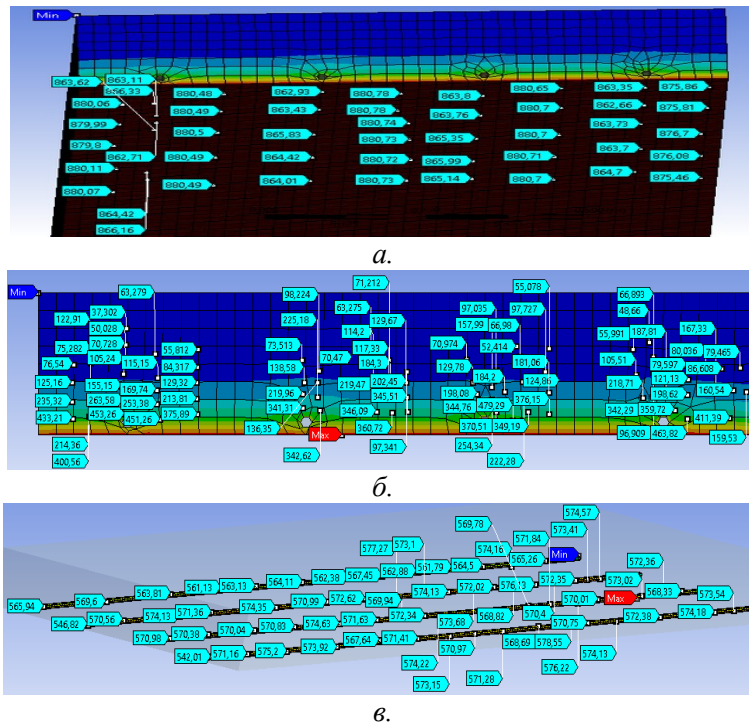


Рисунок 6 – Показники розподілу температури, отримані після впливу стандартного температурного режиму пожежі за 1 годину (а – поверхня, що обігривається, б – переріз конструкції, в – арматура).

За результатами розв'язання теплової задачі проведений аналіз порівняння отриманих показників розподілу усередненої температури з температурною номограмою, рекомендованою Єврокодом 2 [7] (рис.7). Результати відображені у табл. 3.

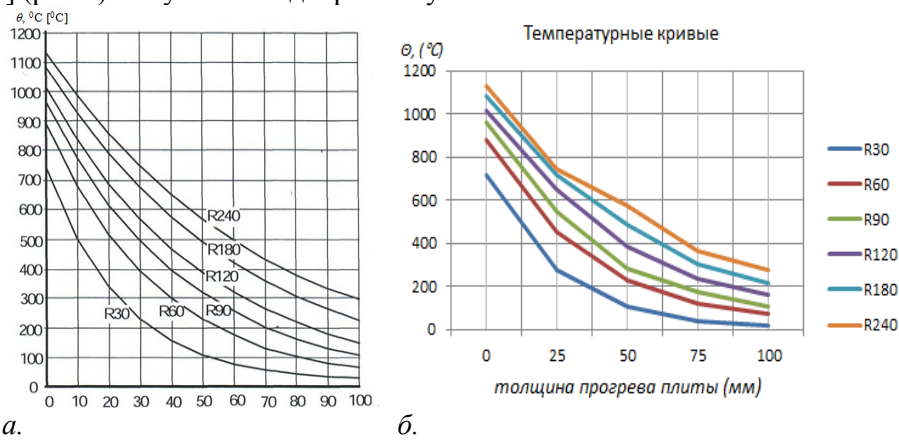


Рисунок 7. Температурна номограма, рекомендована Єврокодом 2 – а, температурні криві, одержані в результаті досліджень – б.

Показники розподілу температури в перерізі плоскої залізобетонної плити за номограмою, рекомендованою Єврокодом 2, досить орієнтовні через усереднені дані, проте вони сформовані на основі проведення експериментальних даних, отриманих внаслідок вогневих випробувань на вогнестійкість у багатьох країнах світу. Відповідно розбіжність показників розподілу температури отриманих в результаті проведеного дослідження та температурних номограм становлять 0,3 – 6,13 %, що підтверджує достовірність отриманих даних та можливості використання даної методики визначення розподілу температури при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі для плоских залізобетонних плит з будь-якою висотою перерізу.

В результаті дослідження на поверхні та в перерізі досліджуваної залізобетонної плити спостерігається закономірність, що полягає в тому, що температури конструкції в місцях, де змонтована арматура дещо менша ніж у місцях, де арматура відсутня. Проте температура над сталевими стрижнями навпаки вища, ніж у місцях, де арматурних стрижнів немає. Це пояснюється тим, що теплопровідність сталевих стрижнів значно перевищує бетону (рис. 3, рис. 4), відповідно сталеві елементи конструкції в плиті прискорюють розподіл температури від стандартного температурного режиму пожежі по всьому перерізу досліджуваної плити.

Таблиця 3 – Показники розподілу температури у перерізі залізобетонної плити за номограмою рекомендованою Єврокодом 2 та в результаті розрахункового методу.

Товщина перерізу конструкції, мм		0	25	50	75	100
Середні показники температури (°C), отримані за допомогою номограми / розрахункового методу						
Час теплового впливу стандартного температурного режиму, хв	30	720/719,1	280/278,4	105/103,2	40/37,3	20/20
	60	880/880,5	450/451,2	230/229,3	120/118,5	75/73,2
	90	960/959,2	550/548,3	310/285,4	190/175,2	105/103,3
	120	1020/1014,4	640/648,3	390/384,8	240/233,6	150/158,6
	180	1080/1084,9	740/715,3	500/483,45	330/301,3	240/217,3
	240	1140/1133,1	800/745,1	600/571,4	400/361,7	300/278,3
Похибки показників температури, %		0,3	2,1	3,23	6,13	5,3

Висновки. Враховуючи проведені дослідження, можна зробити такі висновки:

1. З метою проведення обчислювальних експериментів створено математичні моделі температурної реакції плоскої залізобетонної плити на теплову дію стандартного температурного режиму пожежі з урахуванням рівнянь теплопровідності з урахуванням методу скінчених елементів.
2. Рішення математичних моделей виконувалось з використанням засобів обчислювальної термогазодинаміки, що описує процес тепломасообміну у випробувальних вогневих печах щодо розподілу температури у перерізі залізобетонної плити.
3. За результатами обчислювального експерименту представлено, що показники розподілу температури в перерізі плоскої залізобетонної плити є досить достовірними порівняно з температурними номограмами, рекомендованими Єврокодом 2.
4. На основі отриманих даних та закономірностей розроблено методику визначення показників розподілу температури в перерізах плоских залізобетонних плит, що є підставою для проведення розрахунків з оцінки межі вогнестійкості даних будівельних конструкцій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги ДБН В.1.1-7-2016 [Чинний від 2017-06-01.]. – Міністерство регіонального розвитку та будівництва – 2017. – 35 с – (Національний стандарт України).
2. [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).
3. Lennon T., Moore D.B., Wang Y.K., Bailey K.G. 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 / T. Lennon and others; ed. Series H. Gulvanesyan; Ministry of Education and Science Ross. Federation, FGBOU VPO "Mosk. state builds. un-t "; scientific ed. per. V.M. Roitman, I.A. Kirillov, A.I. Plotnikov; 2nd ed., Moscow - MGSU, 2013. -196 p.
4. 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.
5. Roitman V.M. Engineering solutions for assessing the fire resistance of projected and reconstructed buildings / V.M. Roitman. - M.: Fire safety and science, 2001. - 382 p.
6. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010 (EN 1992-1-1:2004, IDT). [Чинний від 2014-07-01.] – ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК) –2013. – 142 с – (Державний Стандарт України).
7. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 (EN 1992-1-2:2004, IDT). [Чинний від 2013-07-01.] – ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК) –2012. – 131 с – (Державний Стандарт України).
8. Шналь Т. М. Розвиток наукових засад розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за умов впливу параметричних температурних режимів пожеж: дис. докт. техн. наук: 21.06.02 / Шналь Тарас Миколайович – Львів, 2019.
9. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire // MATEC Web of Conferences, 2018, 230, 02026 / [Pozdieiev S.](#), [Nekora O.](#), [Kryshital T.](#), [Zazhoma V.](#), [Sidnei S.](#)

10. [I. Fletcher](#), Behaviour of concrete structures in fire ([I. Fletcher](#), [S. Welch](#), 2010) p.10.2298.- Environmental Science.

REFERENCES

1. 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. 35 p. (The National Standard of Ukraine).
2. Fire protection. Buildings and fragments of buildings. Full-scale fire test method. General requirements. DSTU B B.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).
3. Lennon T., Moore D.B., Wang Y.K., Bailey K.G. 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 / T. Lennon and others; ed. Series H. Gulvanesyan; Ministry of Education and Science Ross. Federation, FGBOU VPO "Mosk. state builds. un-t "; scientific ed. per. V.M. Roitman, I.A. Kirillov, A.I. Plotnikov; 2nd ed., Moscow - MGSU, 2013. -196 p.
4. Pozdieiev S.V. Development of a qualified calculation method for determining the limit of fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures. / Pozdeiev S.V., Levchenko A.D. // Scientific Bulletin of the National Technical University "Lviv Polytechnic". - Lviv: NTU "Lviv Polytechnic". 2011. pp. 264 - 269.
5. Roitman V.M. Engineering solutions for assessing the fire resistance of projected and reconstructed buildings / V.M. Roitman. - M. : Fire safety and science, 2001. - 382 p.
6. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings. DSTU-N B EN 1992-1-1: 2010 (EN 1992-1-1: 2004, IDT). [Chinniy vid 2014-07-01.] - Subsidiary Enterprise "Research Institute for buildings structures" – 2013. - 142 p. - (State Standard of Ukraine).
7. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-2. General rules - Structural fire design DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 (EN 1992-1-2:2004, IDT). [Effective from 2013-07-01.] - Subsidiary enterprise "Research Institute for buildings structures " – 2012. - 131 p. - (State Standard of Ukraine).
8. Shnal T. M. Development of scientific ambushes of a rosary assessment of the fire-fighting of alarm constructions for the minds of parametric temperature regimes in the fire: dis. doct. tech. Sciences: 21.06.02 / Shnal Taras Mykolajovich - Lviv, 2019.
9. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire // MATEC Web of Conferences, 2018, 230, 02026 / [Pozdieiev S.](#), [Nekora O.](#), [Kryshstal T.](#), [Zazhoma V.](#), [Sidnei S.](#)
10. [I. Fletcher](#), Behaviour of concrete structures in fire ([I. Fletcher](#), [S. Welch](#), 2010) p.10.2298.- Environmental Science.

Stanislav Sidnei, PhD in technical sciences,

Cherkassy Institute of Fire Safety Named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense in Ukraine

DEVELOPMENT OF METHODS OF CALCULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN FLAT REINFORCED CONCRETE SLABS IN THE FIRE

The paper presents and analyzes the methods which may help to determine the temperature distribution when the building structures are exposed to the standard temperature regime of a fire.

To implement reliable computational experiments, the mathematical models for reinforced concrete slabs were developed with a description and temperature response to elevated temperatures from the standard temperature regime of a fire, taking into account the equations of thermal conductivity in their numerical solution based on the finite element method.

The calculation of these mathematical models was carried out using the tools of computational thermogasdynamics, describing the process of heat and mass transfer in fired test furnaces when assessing the fire resistance of reinforced concrete slabs.

The results of the computational experiment have shown that the indicators of temperature distribution in the cross-section of a reinforced concrete flat slab are quite reliable in comparison with the temperature nomograms recommended by the Eurocode 2 [10].

On the basis of the obtained data and regularities, a method was developed for determining the temperature distribution indicators in the cross-sections of reinforced concrete flat slabs, which is the basis for calculating the fire resistance limit of these building structures.

Key words: *flat reinforced concrete plate, "standard temperature fire", specific heat, thermal conductivity.*