

УДК 624.012

*Олександр ТИЩЕНКО* д-р техн. наук, проф. (ідентифікатор ORCID: 0000-0002-0677-4774)

*Станіслав СІДНЕЙ*, канд. техн. наук (ідентифікатор ORCID: 0000-0002-7664-6620)

*Ольга Некора*, канд. техн. наук, с. н. с. (ORCID: 0000-0002-5202-3285),

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

*Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ* канд. техн. наук, доц. (ідентифікатор ORCID: 0000-0002-4043-1206)

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

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ РЕБРИСТОЇ ПЛИТИ**

*У роботі представлений алгоритм проведення уточненого розрахунку з вогнестійкості залізобетонної ребристої плити змодельованої за типом конструкції ПР 63-15. Отримані результати розподілу температури у змодельованій залізобетонній ребристої плити на протязі 60 хв. Використовуючи метод скінченних елементів проведені тепломеханічні розрахунки з оцінки вогнестійкості залізобетонної ребристої плити при 50%, 70% та 100% рівні навантаження від максимального. За результатами проведених досліджень оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити визначені закономірність, що встановлює залежність між показниками вогнестійкості та рівнем прикладеного механічного навантаження.*

**Ключові слова:** *скінченно-елементна модель, математичне моделювання, стандартний температурний режим пожежі, межа вогнестійкості.*

Використання виробничих та складських будівель та споруд передбачає великі площі приміщень без опорних конструкцій, що змушує будівельників проектувати перекриття або покриття із великими прольотами. Одним з типів конструкцій, що дозволяє перекрити великі прогони є залізобетонні ребристі плити [1]. Завдяки конструкторським особливостям, що підвищують жорсткість та несучу здатність даних конструкцій, а саме влаштування повздовжніх та поперечних ребер, залізобетонні ребристі плити спроможні перекрити великі прольоти не переходячи до граничних станів I-ої та II-груп.

Подібні конструкції призначені для сприйняття постійного навантаження від власної ваги, обладнання, а також для періодичного навантаження від опадів.

**Постановка проблеми.** Основними принципами сучасного будівництва є гарантування безпеки людям, що планують використовувати будівельні споруди та будівлі на протязі необхідного терміну [2]. При тому необхідно забезпечувати й комфорт, передбачуючи як можна найраціональніші фінансові витрати на реалізацію відповідних будівельних проєктів. Одним з вирішальних напрямків, щодо гарантування безпеки людям під час виникнення пожежі є зменшення ризику загрози під час проведення евакуації до настання критичних показників небезпечних чинників пожежі. Для досягнення даного аспекту необхідно гарантувати роботу особливо відповідальних конструкцій певний час при тепловому впливі пожежі з мінімальними ризиками, щодо загрози життю та здоров'ю людини. Реалізація даного аспекту передбачається в тому числі при проведенні оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій. Існує декілька методів щодо проведення оцінки вогнестійкості конструктивних елементів будівель. Принципи даних методів полягають у визначенні часу від початку теплового впливу за стандартним температурним режимом пожежі до настання одного з граничних станів з вогнестійкості. Можливості натурних та експериментальних випробувань обмежені влаштуванням необхідних конфігурацій печей

для проведення подібних досліджень [3,4]. При цьому вартість та трудомісткість даних робіт в порівнянні з розрахунковими методами суттєво перевищуються та мають негативний вплив на навколишнє середовище.

Отже виконання досліджень щодо проведення оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за допомогою комп'ютерного моделювання є актуальним.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Розрахунковий метод за допомогою комп'ютерного моделювання, надає можливість відтворити умови роботи будівельної конструкції при пожежі у повному обсязі [5, 6]. Даний варіант проведення досліджень передбачає застосування різних геометричних параметрів конструкцій, прикладання будь-якого рівня навантаження, використовуючи різноманітні теорії міцності різних матеріалів, що суттєво розкриває можливості обчислювальних експериментів. Відповідно об'єктивність результатів, щодо визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, отриманих за допомогою математичного моделювання складно переоцінити.

Визначення вогнестійкості залізобетонних ребристих плит перекриттів будівель та споруд проводиться за допомогою розрахункового методу [7 – 9], де представлені 3 методи: табличний, спрощений та уточнений.

За табличним методом перевірка відповідності класу вогнестійкості даних конструкцій виконується лише за шириною ребра, товщини самої плити та мінімальних відстаней до вісі арматури [9]. Відповідно результати отримані за даним методом не враховують висоту перерізу основних компонентів цієї плити, класу бетону та арматури, а також один з основних критеріїв, який дуже суттєво впливає на вогнестійкість – це рівень навантаження [10]. При цьому існує обмеженість застосування даного методу за геометричними параметрами даних конструкцій, а саме, для перевірки показника вогнестійкості за табличним методом ширина поздовжнього ребра та товщина полиці плити повинні бути не менше ніж 80 мм. Отже спостерігається деяка обмеженість застосування даного методу при цьому в показниках закладені великі коефіцієнти запасу, що не надає можливість отримати найбільш достовірні дані за табличним методом.

Використання зонного методу перевірки показників вогнестійкості ребристих залізобетонних плит взагалі не передбачається можливим, у зв'язку із різним характером теплового впливу пожежі [9]. Отже поздовжні ребра отримують вплив пожежі з двох боків поперечні ребра, що знаходяться по краях з двох боків та в середині з трьох трьох боків, а полиця плити з одного боку (рис. 2). Таким чином, відповідна схема теплового впливу від пожежі до залізобетонних ребристих плит не дає можливість визначити яким чином буде розподілятися температура по даному типу конструкцій, що унеможливує застосування зонного методу оцінки вогнестійкості залізобетонних ребристих плит [9].

Уточнений метод має суттєву перевагу над табличним та зонним методами у зв'язку із можливістю застосування до залізобетонних плит з різними геометричними параметрами, типами навантажень, матеріалів та граничних умов, однак є найскладнішим за застосуванням та потребує використання потужних програмних комплексів придатних до розв'язання нелінійних теплотехнічних та механічних задач [11, 12].

Таким чином, проведення експериментальних обчислювальних досліджень щодо оцінки вогнестійкості залізобетонних ребристих плит, за допомогою методу скінченних елементів є актуальним.

**Постановка завдання.** Мета дослідження полягає у вивченні поведінки залізобетонної ребристої плити типу ПР 63-15 при пожежі за умовами механічного навантаження на 50%, 70% та 100% від розрахункового рівня навантаження за несучою здатністю конструкції.

Для вирішення мети дослідження поставлені наступні задачі:

- відтворити геометричну модель залізобетонної ребристої плити типу ПР 63-15 у відповідності до реальних розмірів із врахуванням відповідного армування для подальшого її використання у проведенні обчислювальних експериментів;
- створити обчислювальну модель для розв'язання теплотехнічної нелінійної

задачі розподілу температури по досліджуваній конструкції за допомогою скінченно-елементної сітки з використанням гексадральних скінченних елементів;

- створити математичні моделі, щодо вирішення сумісної тепломеханічної задачі для проведення досліджень напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити при впливі пожежі із використанням нелінійної моделі поведінку бетону Друкера – Прагера;

- за результатами проведених обчислювальних експериментів щодо оцінювання вогнестійкості змодельованої залізобетонної ребристої плити за умовами навантаження на 50%, 70% та 100% від розрахункового рівня навантаження за несучою здатністю, побудувати діаграми прогину конструкції;

- встановити залежність між показниками вогнестійкості змодельованої залізобетонної ребристої плити та рівнем прикладеного механічного навантаження та побудувати відповідну діаграму.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.** З метою вивчення нелінійної поведінки залізобетонної ребристої плити при механічному навантаженні та за умовами теплового впливу від стандартного температурного режиму пожежі змодельована ідентична конструкція, що повністю відповідає конструктивним та геометричним параметрам залізобетонної ребристої плити серійного типу ПР 63-15. Геометрична модель досліджуваної конструкції представлена на рис. 1.

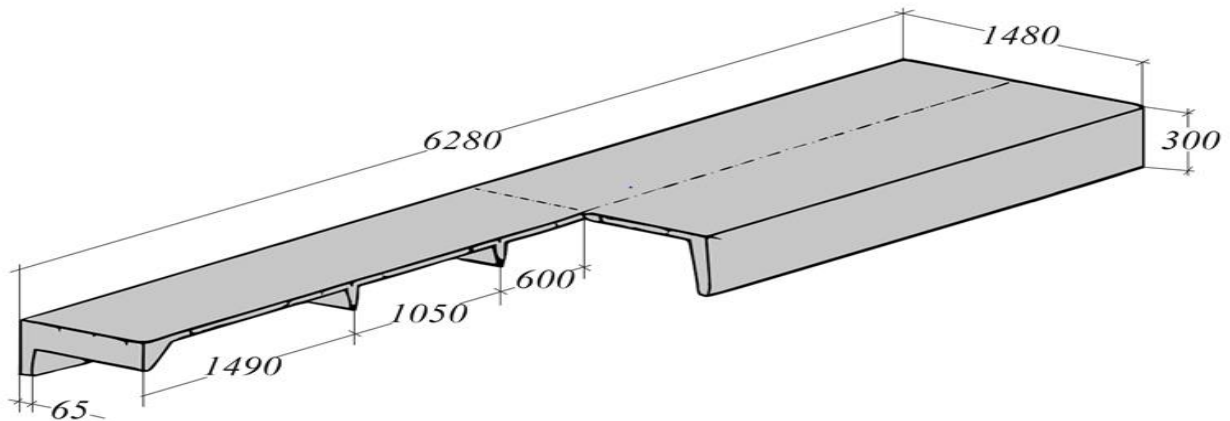


Рисунок 1 – Геометрична модель досліджуваної залізобетонної ребристої плити.

За результатами імпортованої геометрії досліджуваної конструкції побудована скінченно-елементна модель із застосуванням скінченних елементів у формі гексайдерів (рис. 2).

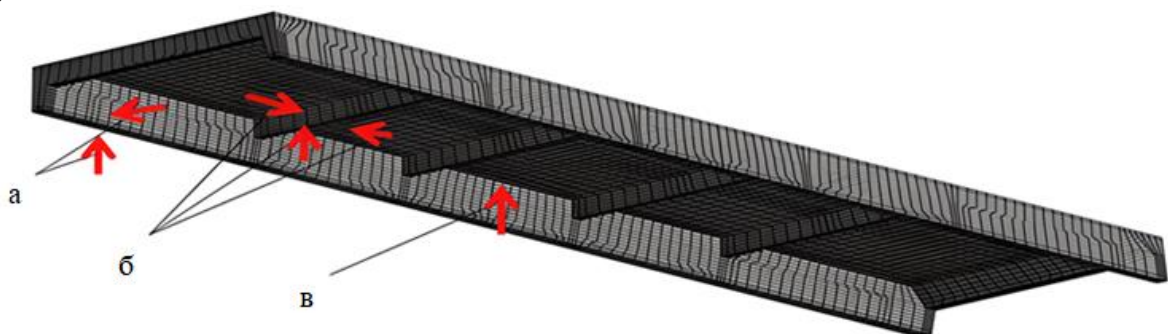


Рисунок 2 – Скінченно-елементна модель та схеми вогневого впливу пожежі на основні конструктивні компоненти залізобетонної ребристої плити: *a* – повздовжнього ребра, *б* – поперечних ребер, *в* – полиця.1

Загальна кількість скінченних елементів складає понад 13000 одиниць.

Застосовувались матеріали бетону класу С 30/35 та сталеві арматури А400.

При проведенні обчислювальних експериментів, щодо впливу стандартного температурного режиму пожежі прийняті теплофізичні характеристики по матеріалах досліджуваної конструкції бетону та сталевій арматурі у відповідності до вимог [9].

Для розв'язання використовувалась теорія міцності бетону Друкера-Прагера критерії якої наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Критерії теорії міцності бетону Друкера-Прагера

№	Температура, $\Theta$ , °C	Одноосьова міцність на стиск, $\sigma_{c1}$ , МПа	Одноосьова міцність на розтяг, $\sigma_{s1}$ , МПа	Двовісна міцність на стиск, $\sigma_{c2}$ , МПа
1	0	30	3	45
2	100	30	3	45
3	500	18	1,8	27
4	600	13,5	1,35	20,25
5	800	4,5	0,45	7,25
6	900	2,4	0,24	3,6

За результатами теплотехнічного розрахунку, щодо впливу стандартного температурного режиму пожежі отримані результати, що представлено на рис. 3. Термін теплового впливу пожежі прийнятий 1 година.

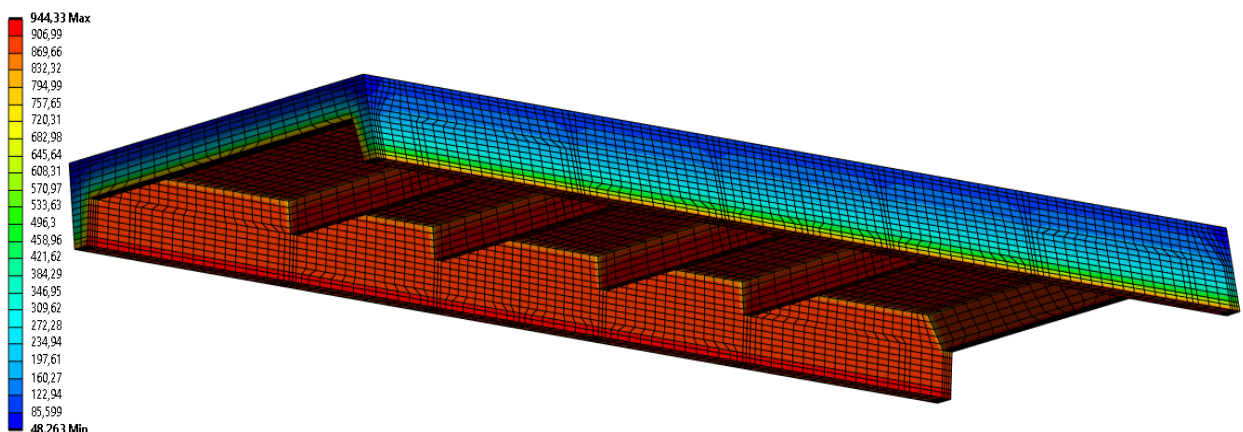


Рисунок 3 – Розподіл температури у змодельованій залізобетонній ребристій плиті при пожежі терміном 60 хв.

Обчислювальні експерименти щодо оцінки вогнестійкості залізобетонної ребристої плити проведені за умовами навантаження на 50% 70% та 100% від розрахункового рівня навантаження за несучою здатністю конструкції, що складає: 2550 Па, 3570 Па, та 5100 Па відповідно

Враховуючи складність проведення нелінійних механічних розрахунків при впливі стандартного температурного режиму пожежі, навантаження прикладалось покроково за 15 кроків на протязі 5 хвилин до настання теплового впливу від пожежі.

Порівняння поточних значень переміщень і швидкостей з гранично допустимими, що визначаються за формулами визначення граничних деформацій (1) та граничне значення швидкості наростання деформації (2) [13]:

$$f = l^2 / (400h) \quad (1)$$

$$dt = l^2 / (9000h), \quad (2)$$

де  $l$  – довжина прольоту плити, мм,

$h$  – висота перерізу поздовжнього ребра плити, мм

За структурною схемою, обпирання конструкції виконується на повздовжніх ребрах протяжністю 300 мм з усіх боків. Отже, критичний прогин прийнятий 268,853 мм (1), а граничне значення швидкості наростання деформації 11,949 мм (2). За результатами проведених розрахунків, щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити побудована діаграма, що наведена на рис. 4.

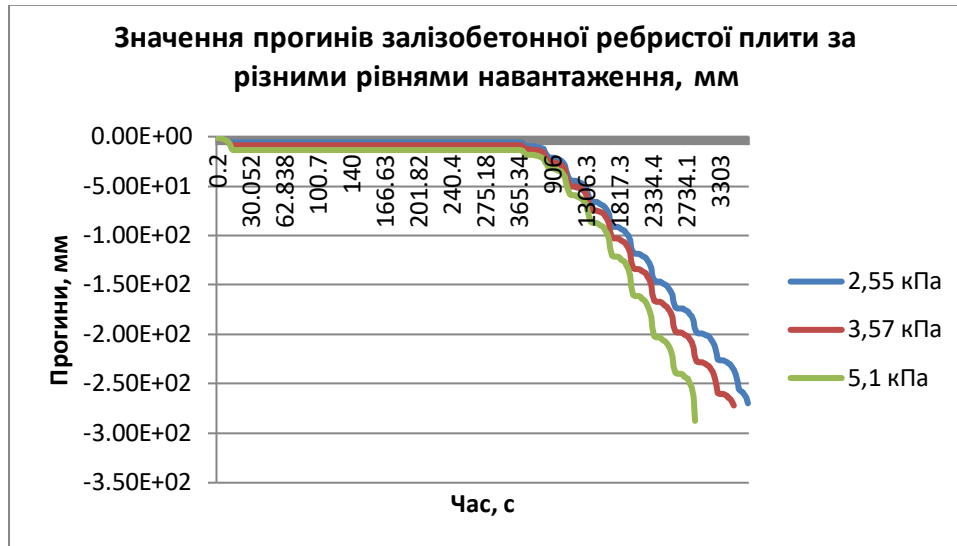
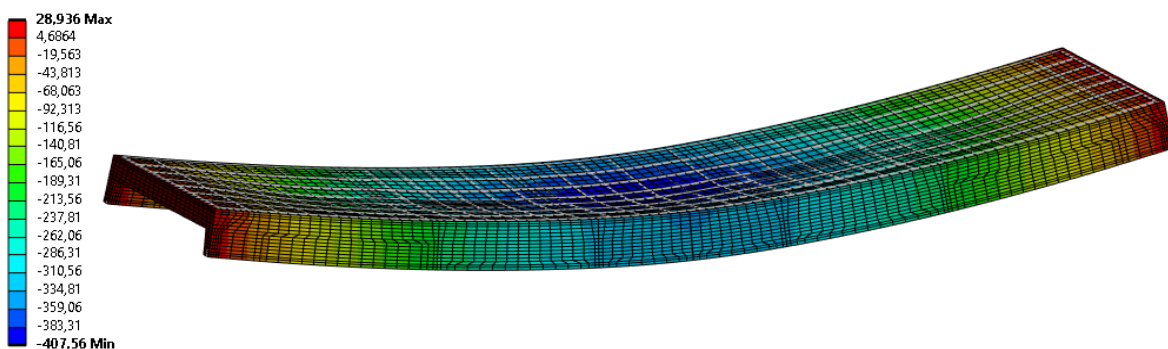
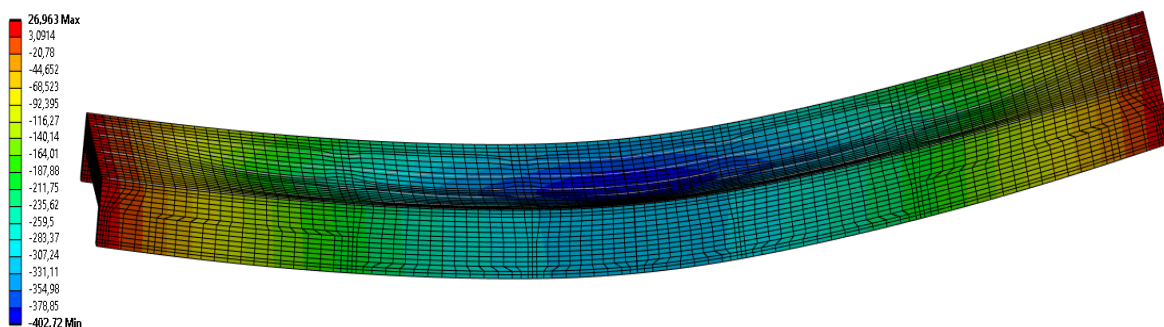
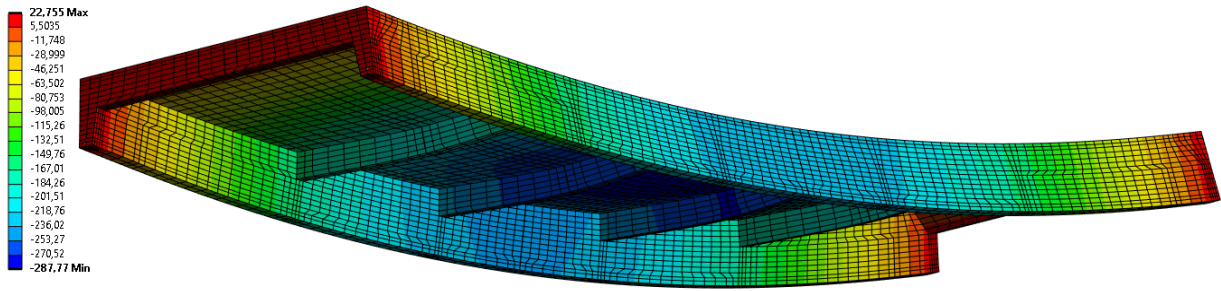


Рисунок 4 – Прогини залізобетонної ребристої плити при пожежі за рівнями навантаження 2,55 кПа, 3,57 кПа, 5,1 кПа.

Отримані результати вказують, що настання граничного стану вогнестійкості за втратою несучої здатності залізобетонної ребристої плити, що навантажена 5,1 кПа спостерігається на 43,9 хв (рис. 4), причому швидкість наростання деформації також зафіксовано в той же час на 2634,4 с та склало 18,41 мм/хв. На рис. 5 представлені прогини досліджуваної залізобетонної плити за різними рівнями прикладеного навантаження.



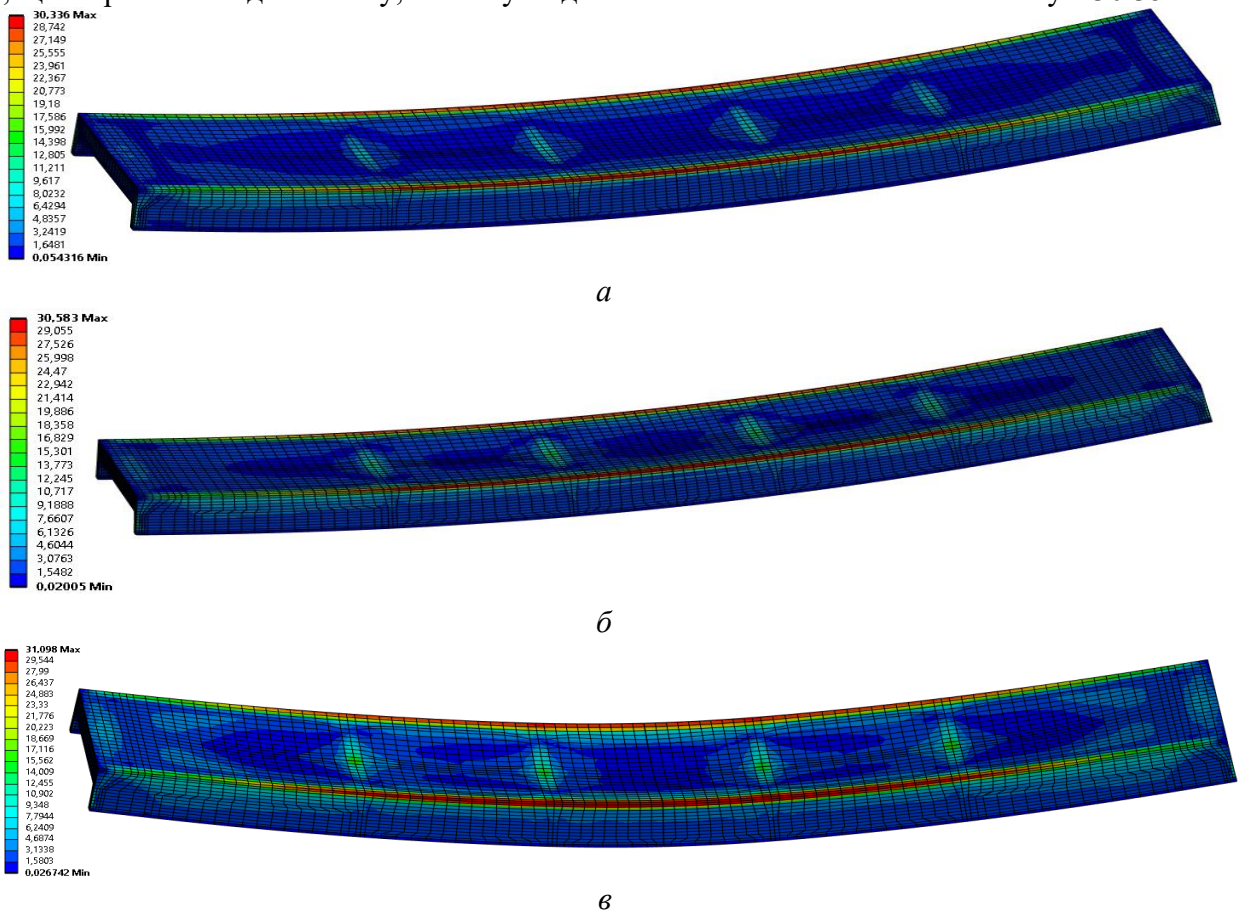


6

Рисунок 5 – Прогини залізобетонній ребристий плити при пожежі за рівними навантаження (а - 2,55 кПа; б - 3,57кПа; в - 5,1 кПа).

Настання критичного прогину у досліджуваній конструкції, що навантажена на 50% та 70 % спостерігається на 51хв та 57 хв відповідно. Швидкість наростання деформації у даних варіантах навантаження конструкції до вказаного часу не спостерігаються. Розрахунки оцінки вогнестійкості проводились за настанням граничного стану за втратою несучої здатності, без врахувань утворення тріщин.

Максимальні напруження, що утворюються під час деформацій за різними рівнями навантаження спостерігаються у верхній частині поздовжніх ребер та перевищують 30 МПа рис. б, що є критичним для бетону, так як у моделюванні застосований бетон класу С30/35.



6

Рисунок 6 – Показники розподілу напружень по залізобетонній ребристий плити при пожежі за рівними навантаження (а – 2,55 кПа; б – 3,57кПа; в – 5,1 кПа).

За результатами обчислювальних експериментів щодо проведенні оцінки вогнестійкості залізобетонної плити встановлена, закономірність, що встановлює залежність між показниками вогнестійкості та рівнем прикладеного механічного навантаження (рис. 7).



Рис. 7 – Залежність між показниками вогнестійкості та рівнем механічного навантаження залізобетонній ребристий плити.

Виходячи з отриманих даних, можемо зробити наступні висновки.

**Висновки.** Використовуючи метод скінченних елементів при застосуванні теорії міцності Друкера-Прагера було проведення дослідження вогнестійкості залізобетонної ребристої плити. За результатами даної роботи було отримано:

1. З метою отримання найбільш достовірних результатів при проведенні обчислювальних експериментах змодельована геометрична модель залізобетонної ребристої плити типу ПР 63 – 15 у відповідності до реальних розмірів із врахуванням відповідного армування.

2. Для визначення розподілу температури у досліджуваній залізобетонній ребристої плити в умовах пожежі створені скінченно-елементні моделі за допомогою скінченних елементів гексадральної форми, що відтворюють тепломасообмін при проведенні вогневих випробувань у спеціальних печах.

3. Побудовані математичні моделі за допомогою методу скінченних елементів для вирішення сумісної тепломеханічної задачі при проведенні досліджень напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити при впливі пожежі із використанням нелінійної моделі поведінку бетону Друкера – Прагера.

4. За результатами проведених обчислювальних експериментів щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити побудовані діаграми прогину досліджуваної конструкції, за різними рівнями навантаження від максимального 50%, 70% та 100% та визначена межа їх вогнестійкості: 57 хв, 51 хв та 43,9 хв відповідно.

5. За результатами проведених досліджень оцінки вогнестійкості залізобетонної ребристої плити визначені закономірність, що встановлює залежність між показниками вогнестійкості та рівнем прикладеного механічного навантаження.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. «Features of evaluation of fire resistance of reinforced concrete ribbed slab under combined effect "explosion-fire"» Vasilchenko Alexey, Danilin Olexandr, Lutsenko Tatiana Materials Science Forum Volume 1038 MSF, Pages 492 - 499 2021 Annual International Scientific

Applied Conference on Problems of Emergency Situations, PES 2021 Kharkiv 20 May Code 261659.

2. «Progressive collapse resistance of reinforced concrete beam-column connection under fire conditions» Yao Yao, Huiyun Zhang, Yan Fei Zhu, Yufei Liu, Structures Volume 47, January 2023, Pages 1265-1283.

3. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. MATEC Web of Conferences, 2017, 116, 02027.

4. 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.

5. Concrete Reinforcing Steel Institute - CRSI [2015]. "Fire Resistance of Reinforced Concrete Buildings", CRSI Technical Note ETN-B-1-16, Schaumburg, Illinois, 6 pp.

6. «Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions» Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei, Materials Science Forum, 2020 Volume 1006 – p. 107 – 116.

7. «Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition», Valeriia Nekora, Stanislav Sidnei, Taras Shnal, Olga Nekora, Iryna Dankevych, Serhii Pozdieiev. Eastern-European Journal of Enterprise Technologiethis, 2021, 6/7 (114) p. 59.

8. «Experimental and computer researches of ferroconcrete beams at high-temperature influences», Otrosh Yu., Surianinov M., Holodnov O., Starova O. Materials Science Forum, 2019, 968 p. 355–360.

9. BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014 Eurocode 2: Design of concrete structures General rules and rules for buildings.

10. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги ДБН В.1.1-7-2016. Міністерство регіонального розвитку та будівництва – 2017. – 35 с.

11. EN 1992-1-2:2004+A1:2014 EUROCODE 2: DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES GENERAL RULES AND RULES FOR BUILDINGS.

12. «Effects of Load Level on the Structural Fire Behaviour of GFRP-Reinforced Concrete Beams with Straight-End bar Lap Splices», Gurung S., Salem O., 2023 Lecture Notes in Civil Engineering 267, pp. 85-92.

13. Determination of structural reliability of a reinforced concrete slab under fire Load Zafarullah N., Eltigani A., Nakayama A., Bilal H.S.M., 2022 E3S Web of Conferences 347,01009.

14. «Numerical study and proposal of new design equations for steel decking concrete slabs subjected to fire», Bolina F.L., Rodrigues J.P.C., 2022 Engineering Structures 253,113828.

15. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В.1.1-4-98\*. [Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с – (Національний стандарт України).

## REFERENCES

1. «Features of evaluation of fire resistance of reinforced concrete ribbed slab under combined effect "explosion-fire"» Vasilchenko Alexey, Danilin Olexandr, Lutsenko Tatiana Materials Science Forum Volume 1038 MSF, Pages 492 - 499 2021 Annual International Scientific Applied Conference on Problems of Emergency Situations, PES 2021 Kharkiv 20 May Code 261659.

2. «Progressive collapse resistance of reinforced concrete beam-column connection under fire conditions» Yao Yao, Huiyun Zhang, Yan Fei Zhu, Yufei Liu, Structures Volume 47, January 2023, Pages 1265-1283.

3. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. MATEC Web of Conferences, 2017, 116, 02027.



4. 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.
5. Concrete Reinforcing Steel Institute - CRSI [2015]. “Fire Resistance of Reinforced Concrete Buildings”, CRSI Technical Note ETN-B-1-16, Schaumburg, Illinois, 6 pp.
6. «Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions» Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei, Materials Science Forum, 2020 Volume 1006 – p. 107 – 116.
7. «Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition», Valeriia Nekora, Stanislav Sidnei, Taras Shnal, Olga Nekora, Iryna Dankevych, Serhii Pozdieiev. Eastern-European Journal of Enterprise Technologiethis, 2021, 6/7 (114) p. 59.
8. «Experimental and computer researches of ferroconcrete beams at high-temperature influences», Otrosh Yu., Surianinov M., Holodnov O., Starova O. Materials Science Forum, 2019, 968 p. 355–360.
9. BS EN 1992-1-1:2004+A1:2014 Eurocode 2: Design of concrete structures General rules and rules for buildings.
10. 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).
11. EN 1992-1-2:2004+A1:2014 EUROCODE 2: DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES GENERAL RULES AND RULES FOR BUILDINGS.
12. «Effects of Load Level on the Structural Fire Behaviour of GFRP-Reinforced Concrete Beams with Straight-End bar Lap Splices», Gurung S., Salem O., 2023 Lecture Notes in Civil Engineering 267, pp. 85-92.
13. Determination of structural reliability of a reinforced concrete slab under fire Load Zafarullah N., Eltigani A., Nakayama A., Bilal H.S.M., 2022 E3S Web of Conferences 347,01009.
14. «Numerical study and proposal of new design equations for steel decking concrete slabs subjected to fire», Bolina F.L., Rodrigues J.P.C., 2022 Engineering Structures 253,113828.
15. Building structures. Test method for fire resistance. General requirements. Fire safety. (ISO 834: 1975) DSTU B B.1.1-4-98 \*. [Effective from 1998-10-28.] - Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2005. 20 p. (The National Standard of Ukraine).

#### **STUDY OF THE FIRE RESISTANCE OF A REINFORCED CONCRETE SLAB**

*Tyshchenko O. M. doctor of technical sciences, professor (ORCID: 0000-0002-0677-4774)*

*Sidnei S. O. PhD in technical sciences (ORCID: 0000-0002-7664-6620)*

*Nekora O.V., PhD in technical sciences, Senior Research Officer (ORCID: 0000-0002-5202-3285),*

*Rudeshko I. V. ORCID: 0000-0003-3294-2214)*

*,Berezovskyi, A.I. PhD in technical sciences, assistant professor ORCID: 0000-0002-4043-1206)*

*Cherkasy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine*

*The work presents an algorithm for carrying out a refined method of calculating the fire resistance of a reinforced concrete ribbed slab modeled according to the design type PR 63-15 when using the finite element method. The parameters of the Drucker–Prager theory of concrete*

*strength were used in the calculations. The finite-element model consisted of more than 13,000 finite elements of hexahedral shape.*

*To solve the thermal problem, the thermophysical characteristics of concrete and steel reinforcement were used, which correspond to the temperature dependences recommended by the second part of Eurocode 2. To reproduce the heat exchange during the influence of the standard temperature regime of the fire, an unsteady two-dimensional quasi-linear equation of thermal conductivity is used, assuming that the stress-strain state does not affect the temperature distribution. Boundary conditions of the IIIrd kind are given, which is also recommended for the second part of Eurocode 2. The results of the temperature distribution in the simulated reinforced concrete ribbed slab during 60 min are obtained. The temperature indicators were used in solving the compatible thermomechanical problem of evaluating the fire resistance of the studied reinforced concrete ribbed slab at 50%, 70% and 100% load level from the maximum. The fire resistance of the board was evaluated according to the limit state of the loss of load-bearing capacity (R) without taking into account the formation of cracks or through defects. The maximum stresses in the concrete of the studied structure, which are formed during deformations at different load levels, are observed in the upper part of the longitudinal ribs and exceed 30 MPa, which is critical for concrete with such compressive strength.*

*Based on the results of the research, a regularity was determined that establishes the relationship between fire resistance indicators and the level of applied mechanical load.*

**Keywords:** *finite-element model, mathematical modeling, standard fire temperature regime, fire resistance limit.*