



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2024-8>

УДК 624.014 + 536.21



БАШИНСЬКИЙ О.В.

Аспірант кафедри металевих та дерев'яних конструкцій, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, e-mail: alex.bashyinsky97@gmail.com, тел.: +38 (093) 766-46-76, ORCID: 0000-0003-2466-4306

ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ ПЕРЕКРИТТЯ В УМОВАХ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ

АНОТАЦІЯ

В статті детально описано алгоритм розрахунку сталеві балки перекриття на високі температурні впливи. Автори статті описують вирішення задачі нестационарної теплопровідності за допомогою ПК ЛІРА-САПР. Після отримання результатів розрахунку теплопровідності автор використовує їх для оцінки напружено-деформованого стану навантаженої сталеві балки перекриття. Цей підхід дає можливість отримати глибоке розуміння того, як теплові навантаження впливають на напружено-деформований стан сталеві балки та її здатність витримувати навантаження в умовах пожежі.

В дослідженні, що представлено в статті, приймається до уваги нелінійна зміна теплофізичних характеристик сталі та вогнезахисного матеріалу, що дозволяє більш точно проаналізувати розподілення температури по перерізу сталеві балки.

На відміну від спрощеного методу розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість, метод, наведений в статті, дозволяє отримати значення температури в будь-якій точці перерізу сталеві

балки на будь-якій відмітці часу.

Після розрахунків теплопровідності та визначення розподілу температур по перерізу конструкції автор переходить до оцінки напружено-деформованого стану конструкції. Методика оцінки напружено-деформованого стану, надана в статті, полягає у зниженні модуля пружності деформації перерізу та граничного опору сталі. Також автор порівнює результати дослідження з результатами натурного експерименту.

Стаття буде корисною для інженерів-проектувальників, які працюють зі сталевими конструкціями, а також для дослідників, які цікавляться впливом вогнезахисних матеріалів на вогнестійкість конструкції. Вона надає цінні наукові і практичні відомості, які можуть бути використані для підвищення безпеки та надійності сталевих конструкцій у вогнестійких умовах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теплопровідність, вогнестійкість, напружено-деформований стан, нелінійність, ЛІРА-САПР, метод скінчених елементів, конвекція, температурний вплив, моделювання.



ASSESSMENT OF BEARING CAPACITY OF STEEL BEAM UNDER HIGH-TEMPERATURE EFFECT

ABSTRACT

The article describes in detail the algorithm of steel beam analysis for high-temperature effects. The article's author describe the solution of the nonstationary thermal conductivity problem using the LIRA-SAPR software. After obtaining the results of the thermal conductivity analysis, the author use them to assess the stress-strain state of a loaded steel beam. This approach provides an in-depth understanding of how thermal loads affect the stress-strain state of a steel beam and its ability to withstand loads in a fire.

The study presented in this article considers the nonlinear change in the thermal and physical characteristics of steel and fireproofing material, which allows for a more accurate analysis of the temperature distribution across the cross-section of a steel beam.

In contrast to the simplified method of steel structures fire resistance analysis, the method presented in this article allows to obtain the temperature value at any point of the steel beam section at any time.

After thermal conductivity analysis and determination of the temperature distribution across the cross-section of the beam, the author proceed to the assessment of the stress-strain state of the structure. The methodology for assessing the stress-strain state presented in the article is to reduce the modulus of elasticity of the section and the ultimate resistance of steel. The author also compare the results of the study with the results of a full-scale experiment.

The article will be useful for civil engineers working with steel structures and researchers interested in the impact of fire protection materials on the fire resistance of a structure. It provides valuable scientific and practical information that can be used to improve the safety and reliability of steel structures in fire-resistant environments.

KEYWORDS: thermal conductivity, fire resistance, stress-strain state, nonlinearity, LIRA-SAPR, finite element method, convection, thermal effect, modeling.

ВСТУП

В умовах ведення війни інженери та науковці стикнулися з новими та досить складними проблемами: захистом цивільних будівель та об'єктів інфраструктури від ураження ракет, дронів та снарядів. Захищати будівлі від цих видів ураження дуже складно, практично неможливо. Проте в нас є можливість захиститися від наслідків цих згубних для будівель впливів. Одними із способів захисту є оцінка вибухового впливу [1] та підсилення несучих конструкцій будівлі задля протидії пожежі.

Наразі відомі випадки, коли конструкції витримують падіння ракети, бомби тощо, але не витримують наслідків, а саме пожежу. При розвитку пожежі у будівлях та спорудах, що складаються із сталевих конструкцій, основні несучі конструкції починають активно деформуватися та втрачати свою несучу здатність вже через 15 хвилин після виникнення пожежі. Будівельні конструкції з несучими елементами із незахищеного металу руйнуються в рази швидше, ніж залізобетонні, завдаючи величезної матеріальної шкоди та підвищуючи ризик травмування людей, які знаходяться усередині будівель. Запобігання подібним ситуаціям вимагає розробки методик математичного моделювання поведінки конструкцій при впливі високих температур з врахуванням ефективної роботи вогнезахисних матеріалів. Вибір належної методики для створення математичної моделі при розрахунку вогнестійких будівель та споруд та подальшої оцінки напружено-деформованого стану (далі – НДС) конструкцій є критичним етапом проектування, оскільки від нього залежить надійність та безпека при експлуатації конструкції, особливо у воєнний час.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Великий внесок у дослідження впливу пожежі на будівельні конструкції внесли такі вітчизняні вчені як: Білик А.С. та Дауров М.К., Ромашкіна М.А. та Башинська О.Ю., Фесенко О.А. та Колякова В.М., Божинський М.О., а також Отрош Ю.А. та Ковальов А.І.

В роботах Білика А.С. та Даурова М.К. [2, 3] влучно описано вплив пожежі на загальну стійкість сталевих каркасних конструкцій. Роботи Барабаш М.С., Ромашкіної М.А. та Башинської О.Ю. [4] та Колякової В.М. та Божинського М.О. [5] описують вплив вогню на залізобетонні конструкції, а в праці Фесенко О.А. та Колякової В.М. [6] описано алгоритм розрахунку дерев'яних конструкцій за методикою Єврокода. Роботи Ковальова А.І. та Отроша Ю.А. [7, 8] дуже чітко описують методи оцінки температурних впливів на сталеві балки. В своїх статтях Ковальов А.І. створює реальні моделі балок в ПК LIRA-SAPR за допомогою пластинчатих елементів. Метод, який він використовує, добре підходить для детального аналізу термонапруженого стану балки, але є досить складним для використання, так як з моделями окремих конструкцій, які було створено в об'ємній постановці, складно працювати.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Існує актуальна потреба у розробці простої та зрозумілої методики для оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій. Ця методика повинна бути



доступною для використання у вітчизняних програмах та легко розумітися всіма інженерами-проектувальниками. Головною метою є створення інструменту, який дозволить ефективно моделювати вплив високих температур на сталеві конструкції та передбачати їхню поведінку у випадку пожежі.

Методика повинна враховувати різноманітні аспекти, такі як нелінійна теплопровідність матеріалів, а також зміни міцнісних характеристик конструкцій під впливом високих температур. Важливо, щоб отримані результати відповідали реальним умовам і враховували відмінності між теоретичними розрахунками та натурними експериментами.

Розробка такої методики має стратегічне значення для підвищення безпеки та надійності будівельних об'єктів. Вона дозволить інженерам більш ефективно прогнозувати поведінку сталевих конструкцій у випадку пожежі та вживати вчасних заходів для їхнього захисту.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Створення та аналіз чисельної моделі поперечного перерізу сталеві балки покриття було виконано в програмному комплексі ПК АІРА-САПР.

Для дослідження була обрана сталева балка двотаврового перерізу ІРЕ 400 (приведена товщина 5,309 мм, коефіцієнт перерізу $A_m/V = 188,4 \text{ м}^{-1}$). Товщина реактивного вогнезахисного покриття складає 1,183 мм [7]. Моделювання попе-

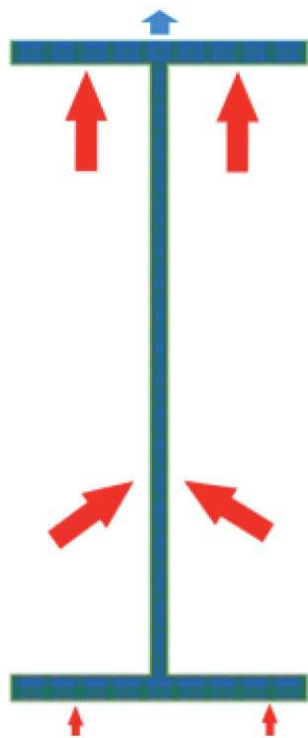


Рисунок 1 – Схема моделі перерізу балки (сторони обігріву та тепловіддачі)

речного перерізу балки з нанесеним вогнезахистом було виконано за допомогою пластинчатих скінченних елементів теплопровідності. Тип скінченного елемента – КЕ 1509 (чотирикутний КЕ теплопровідності). Для моделювання було обрано саме чотирикутний скінченний елемент через те, що цей тип КЕ дозволяє отримати точніші результати, ніж трикутний КЕ. Крок триангуляції – 2 мм. Для врахування теплопередачі між перерізом балки та повітрям було створено елементи конвективного теплообміну (КЕ 1555). Загальна кількість скінченних елементів в моделі – 3520. Схема моделі вказана на рис. 1.

Теплофізичні характеристики матеріалів були задані з врахуванням їх нелінійної зміни при зміні температури. Теплопровідність λ_a та питому теплоємність сталі було вираховано за формулами згідно з [9]. Густина сталі – 7850 кг/м^3 .

Теплопровідність вогнезахисного покриття λ_p було вираховано за формулою:

$$\lambda_p = 4 \cdot 10^{-7} \theta^2 - 0.0004 \cdot \theta + 0.1037 \quad (1)$$

де θ – температура покриття, °С.

Питома теплоємність $c_p = 70,4 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°С}$. Густина – 1420 кг/м^3 [7]. Пораховані характеристики сталі та вогнезахисного покриття представлені у табл. 1.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні покриття $a_c = 25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$. Сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на необігрівній поверхні балки $a^* = 5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$.

Модель перерізу балки обігрівається з трьох сторін, як показано на рис. 1, за умови впливу стандартного температурного режиму протягом 60 хв. Часовий крок розрахунку – 60 секунд. Графік стандартного температурного режиму пожежі наведено на рис. 2.

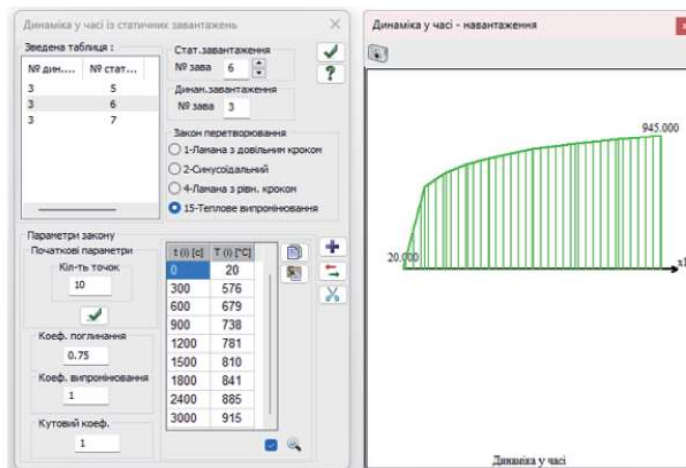


Рисунок 2 – Графік стандартного температурного режиму пожежі



Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики матеріалів

Температура, °С	Сталь		Вогнезахисне покриття	
	$\lambda_{ст}$ Вт/(м·°С)	$c_{ст}$ Дж/кг·°С	$\lambda_{р}$ Вт/(м·°С)	$c_{р}$ Дж/кг·°С
20	53,334	439,802	0,09586	70,4
100	50,67	487,62	0,0677	70,4
200	47,34	529,76	0,0397	70,4
300	44,01	564,74	0,0197	70,4
400	40,68	605,88	0,0077	70,4
500	37,35	666,5	0,0037	70,4
600	34,02	759,92	0,0077	70,4
700	30,69	1008,16	0,0197	70,4
800	27,3	803,261	0,0397	70,4
900	27,3	650	0,0677	70,4
1000	27,3	650	0,1037	70,4

розрахунку з результатами натурального експерименту та дослідження, яке було описано в роботі Ковальова А.І. [7].

За результатами розрахунку нестационарної теплопровідності на часових відмітках 10 та 40 хвилин, що вказані на рис. 3, дуже добре видно нерівномірний розподіл температури по перерізу балки.

Це може бути пов'язано з багатьма факторами, зокрема несиметричністю перерізу та тепловіддачею у верхній частині перерізу. Нерівномірний розподіл тепла призводить до нерівномірного зниження жорсткісних характеристик перерізу. В попередніх дослідженнях [10, 11] жорсткісні характеристики всього перерізу знижувалися за найбільшим значенням температури в перерізі. Такий метод є дієвим, проте не дуже точним, так як реальні жорсткісні характеристики можуть бути вищими. Таке спрощення може призвести до певних економічних збитків при будівництві.

Для більш точного аналізу міцності балки було прийнято рішення задати різні коефіцієнти зниження жорсткості в різних частинах перерізу. Коефіцієнти зниження були враховані за допомогою лінійної інтерполяції та відповідно до [9]. Зниження було виконано відносно результатів теплотехнічного розрахунку на 60-й хвилині (рис. 5).

За допомогою модуля «Конструктор перерізів+» («КП+», ПК ЛІРА-САПР) було враховано аспект, описаний вище. Переріз було розділено на 5 частин і в кожній частині було знижено модуль пружності відносно середньої температури на ділянці. Після цього було виконано розрахунок для

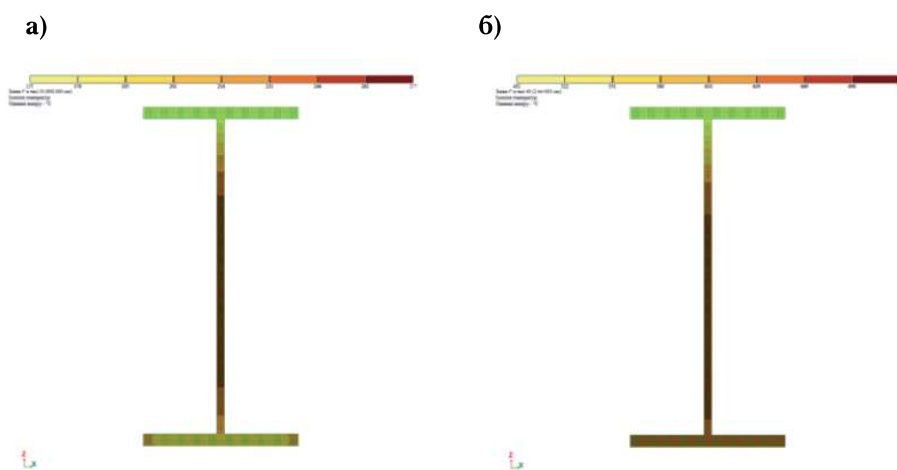


Рисунок 3 – Температурний розподіл в перерізі балки на відмітках часу: а – 10 хв.; б – 40 хв.

Результати розрахунку нестационарної теплопровідності на часових відмітках 10 та 40 хвилин вказані на рис. 3.

Нарис. 4 наведено графік порівняння результатів

отримання приведених жорсткісних характеристик, які вказані в табл. 2.

Після цього було створено модель балки довжиною 4.7 метри, призначено тип жорсткості, отри-

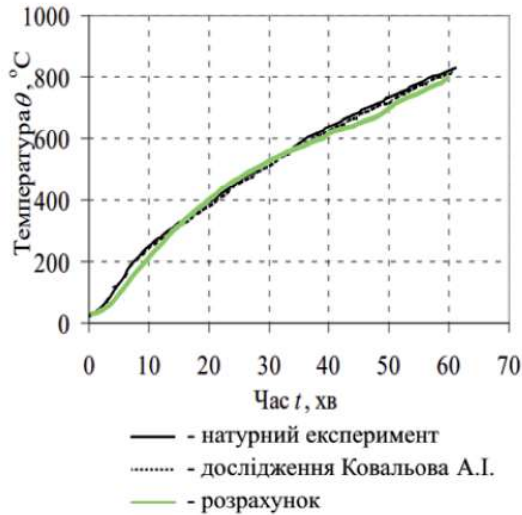


Рисунок 4 – Середня температура в перерізі балки

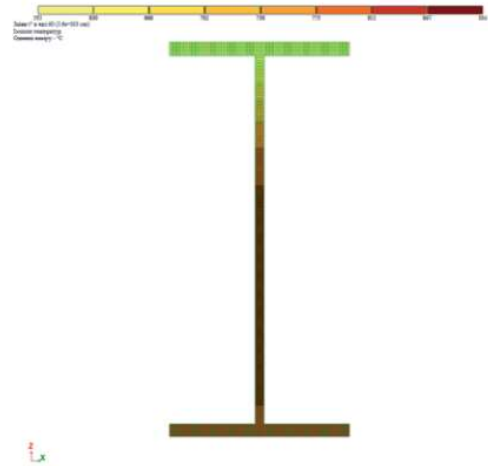


Рисунок 5 – Температурний розподіл в перерізі балки на 60-й хвилині

Таблиця 2 – Приведені жорсткісні характеристики перерізу

EA	26080	тс
EI _u	689.19	тс*м ²
EI _v	49.786	тс*м ²
EI _{uv}	0.26615	тс*м ²
EI _y	689.19	тс*м ²
EI _z	49.786	тс*м ²
ES _y	1833.8	тс*м
ES _z	422.62	тс*м
GJ _t	0.64226	тс*м ²
EI _w	1.485931	тс*м ⁴
GF _y	3849.3	тс
GF _z	4195.7	тс

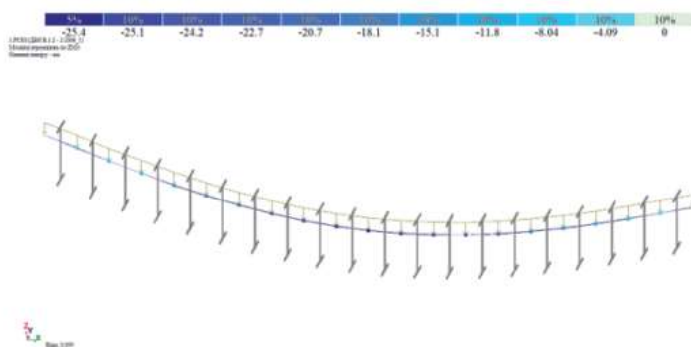


Рисунок 6 – Прогини балки на 60-й хвилині пожежі

маний вище, та задано навантаження, як вказано в [8]. Результати розрахунку балки наведені на рис. 6.

Прогин навантаженої вогнезахищеної балки в середині прольоту становить 25,4 мм, що відповідає експериментальним результатам, які надані в дослідженні Ковальова А.І. [8].

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Метод теплотехнічного розрахунку, представлений в статті, є інженерним та дозволяє адекватно та точно оцінити розподіл температури по перерізу балки. Результати розрахунку балки на прогин показали, що немає необхідності моделювати об'ємну модель конструкції. Спосіб моделювання балки стержень має таку саму точність, проте є простішим та універсальнішим, так як дозволяє моделювати складні конструктивні системи без втрати точності розрахунку.

2. Результати теплотехнічного розрахунку показали, що тепло в перерізі балки розподіляється нерівномірно, що призводить до нерівномірної зміни жорсткісних характеристик



в різних частинах перерізу. Проте врахування цього аспекту не сильно змінює кінцеві результати прогину балки, що приводить нас до висновку, що спосіб, при якому враховується середнє значення температури в перерізі, є більш доцільним, так як є простішим в моделюванні.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Максименко В.П., Барабаш М.С., Костира Н.О., Брамін І.В. Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК LIRA-SAPR. Наука та будівництво. 2023. №4 (38). С.20-27. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>
2. Daurov M., Bilyk A. Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire. Strength of materials and theory of structures. 2019. №102. С. 62-68. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.62-68>
3. Daurov M., Bilyk A. Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality. Strength of materials and theory of structures. 2019. №108. С.325-336. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.325-336>
4. Barabash M., Romashkina M., Bashynska O. Thermal stress state of reinforced concrete floor slab. Strength of materials and theory of structures. 2019. №103. С.43-56. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.103.43-56>
5. Колякова В.М., Божинський, М. О. Розрахунково-теоретичні дослідження розподілу температури в перерізі залізобетонної конструкції східчастих складок. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2017. №1. С.149-157.
6. Фесенко О., Колякова В., Дмитренко Є., Момотюк Д. Розрахунок на вогнестійкість дерев'яних згинальних конструкцій за методикою Єврокоду 5. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2022. №10. С. 94-107. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.94-107>
7. Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих балок. ВІСТІ Донецького гірничого інституту. 2022. №2 (51). С.43-53. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-43-53>
8. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Рашкевич Н.В., Рудаков С.В., Томенко В.І., Юрченко С.П.. Оцінка вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій для забезпечення пожежної безпеки об'єктів. Problems of Emergency Situations. 2023. №1 (37). С. 282-

292. URL: <http://dx.doi.org/10.52363/2524-0226-2023-37-20>

9. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). //К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 98 с.
10. Bilyk S., Bashynska O., Bashynskyi O. Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. Strength of materials and theory of structures. 2022. №108. С. 189-202. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.189-202>
11. Башинський О.В., Башинська О.Ю. Аналіз напружено-деформованого стану вогнезахисної сталеві балки перекриття. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2023. №12. С. 126-138. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.126-138>

REFERENCES

1. Maksymenko V., Barabash M., Kostyra N., Bramin I. (2023) Modeling of dynamic loads of explosive type in the problems of investigation of strength of building structures using LIRA-SAPR software. Science and construction, №4 (38). P.20-27. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>
2. Daurov M., Bilyk A. (2019).Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire. Strength of materials and theory of structures, №102. P. 62-68. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.62-68>
3. Daurov M., Bilyk A. (2022). Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality. Strength of materials and theory of structures, №108. P.325-336. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.325-336>
4. Barabash M., Romashkina M., Bashynska O. (2019). Thermal stress state of reinforced concrete floor slab. Strength of materials and theory of structures, №103. P.43-56. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.103.43-56>
5. Koliakova V., Bozhynskyi M. (2017). Settlement and theretical studies of the temperature distribution in the cross section of concrete staircase folds. Building constructions. Theory and Practice, №1. P.149-157.
6. Fesenko O., Koliakova V., Dmytrenko Y., Momotyuk D. (2022). Fire resistance analysis of bending timber structures according to Eurocode 5. Building constructions. Theory and Practice, №10. P. 94-107. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.94-107>



7. Kovalov A., Purdenko R., Otrosh Y., Tomenko V., Kachkar E., Maiboroda R. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof steel beams. Journal of donetsk mining institute, №2 (51). P.43-53. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-43-53>
8. Kovalov A., Otrosh Y., Rashkevich N., Rudakov S., Tomenko V., Yurchenko S. (2023). Assessment of fire resistance of fireproof steel structures to ensure fire safety of facilities. Problems of Emergency Situations, №1 (37). P. 282-292. URL: <http://dx.doi.org/10.52363/2524-0226-2023-37-20>
9. DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Eurocode 3. Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design (EN 1993-1-2:2005, IDT). //Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2012. – 98 p.
10. Bilyk S., Bashynska O., Bashynskyi O. (2022). Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. Strength of materials and theory of structures, №108. P. 189-202. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.189-202>
11. Bashynskyi O., Bashynska O. (2023). Analysis in the stress-strain state of a fire-resistant steel floor beam. Building constructions. Theory and Practice, №12. P. 126-138. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.126-138>

Стаття надійшла до редакції 04.03.2024 року