

УДК 614.841.415

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.83.90>

*Сергій ПОЗДЄЄВ, доктор технічних наук, професор (ORCID: 0000-0002-9085-0513),
Аліна НОВГОРОДЧЕНКО, доктор філософії (ORCID: 0000-0003-2347-093X),
Яна ЗМАГА, кандидат технічних наук, доцент (ORCID: 0000-0001-8389-9709),
Віталій НОВГОРОДЧЕНКО, ад'юнкт (ORCID: 0009-0009-6484-9242),
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РОЗПОДІЛЕНЬ У ПЕРЕРІЗАХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ

У статті наведені результати розрахунку температурних розподілів всередині перерізу дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням. Предмет досліджень – вплив конструктивних параметрів дерев'яних балок на вогнестійкість в умовах теплової дії високих температур під час пожежі. Мета роботи полягає в розкритті закономірностей прогрівання перерізів дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням плитами OSB, а також зміни геометричних параметрів їхньої зони обуглювання в умовах стандартного температурного режиму пожежі для оцінки їх межі вогнестійкості. Для виконання цієї мети поставлені такі завдання дослідження: на основі проведених вогневих випробувань розробити методичку інтерполяції температурних розподілів всередині зразків-фрагментів дерев'яної балки; розробити методичку математичного описання геометричної форми зони обуглювання у перерізі дерев'яної балки без вогнезахисту та з вогнезахисним облицюванням на основі OSB плит. Для розроблення методички розрахунку температурних розподілів всередині перерізу дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням та для побудови ліній контурів зони обуглювання застосовувалися табличні, теплофізичні методи та математичне моделювання. Наукова новизна дослідження полягає у розкритті закономірностей, що встановлюють залежність конфігурації зони обуглювання дерев'яних балок від конструктивних параметрів їхнього вогнезахисного облицювання в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі, як наукового підґрунтя удосконалення розрахункової оцінки їх вогнестійкості. Після проведення розрахунків отримано головні результати, які дозволяють визначити геометричну конфігурацію необугленої частини перерізу балки та визначити її несучу здатність з використанням реальних геометричних характеристик необугленої частини перерізу дерев'яної балки.

Ключові слова: дерев'яна балка, вогнезахисне облицювання, температурний розподіл, вогнестійкість.

Постановка проблеми. Однією із проблем залишається те, що деревина належить до групи горючих матеріалів, займання яких за певних умов можливе навіть від малокалорійного джерела запалювання. З найбільших ефективних шляхів зменшення негативного впливу пожеж на дерев'яні будівельні конструкції є застосування вогнезахисту даних конструкцій. В сучасних тенденціях щодо вогнезахисних систем дерев'яних конструкцій слід відмітити суттєві переваги вогнезахисту на основі облицювання, зокрема за допомогою вогнетривких плит OSB. Дані плити окрім перспективних вогнезахисних властивостей також мають належні декоративні, монтажні та технологічні. Враховуючи це, можна зазначити, що вивчення закономірностей, які встановлюють залежність геометричних конфігурацій обугленої

зони дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням плитами OSB, а також забезпечення пожежної безпеки таких будівельних об'єктів є актуальним питанням.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Проблеми вогнестійкості та вогнезахисту дерев'яних конструкцій обґрунтовано в працях українських науковців: Антонова А. В., Поздєєва С. В., Новака С. В., Шналя Т. М., Змаги Я. В., Фещука Ю. Л., Семерака М. М., Жартовського В. М., Цапка Ю. В. і зарубіжних дослідників: White R. H., Schaffer E. L., Browne F. L., Lau P. W. C. та інших. Проте вогнезахисні якості вогнетривких плит OSB для дерев'яних балок вивчені недостатньо. Це відповідним чином стримує впровадження розрахункових методів проектування вогнестійкості дерев'яних балок із застосуванням таких вогнезахисних систем у відповідну нормативну базу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Математична модель теплопередачі у дерев'яних балках з прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням.

Для вивчення розподілень температури по перерізу дерев'яних балок із вогнезахистом на основі деревостружкових плит OSB за теплового впливу на дані балки, відповідно до стандартного температурного режиму пожежі був використаний розрахунковий метод, що рекомендований стандартами [1, 2] і заснований на застосуванні одного із наближених числових методів кінцевих різниць для розв'язку рівняння теплопровідності.

Дане рівняння теплопровідності записується у вигляді:

$$C_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial y}\right) \quad (1)$$

де θ – температура, °С;

t – час, с;

$\rho(\theta)$ – температурозалежна густина матеріалу, кг/м³;

$C_p(\theta)$ – температурозалежна питома теплоємність, Дж/(кг·°С);

$\lambda(\theta)$ – температурозалежний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С).

У процесі розв'язання теплової задачі в розрахунковій схемі має бути врахована наявність вогнезахисного облицювання в перерізі дерев'яної балки. А також тепловий вплив пожежі на балку здійснюється з трьох сторін. Наведені аспекти відображено на схемі перерізу балки із вогнезахистом, поданій нижче на рис. 1.

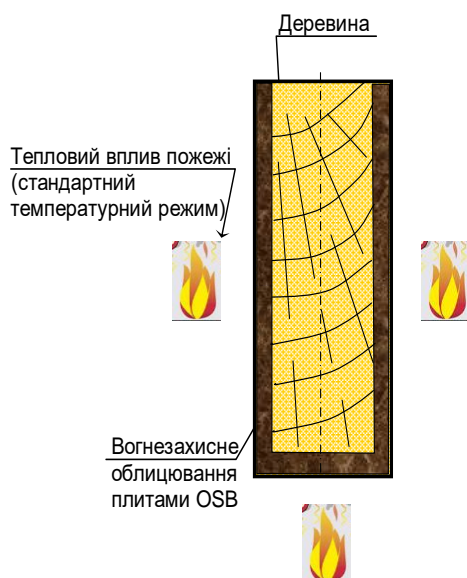


Рисунок 1 – Конструктивна схема перерізу дерев'яної балки із вогнезахисним облицюванням на основі плит OSB

Рівняння нестационарної теплопровідності (1) за заданих теплофізичних характеристиках матеріалів досліджуваних елементів конструкцій, їхніх граничних умов та даної геометричної конфігурації розрахункової області перерізу може бути вирішено тільки чисельними методами.

У даній роботі для визначення температурних розподілів у прямокутному перерізі дерев'яної балки із шаром вогнезахисного облицювання плитами OSB, під час застосування прийнятої математичної моделі теплопровідності, використано метод кінцевих різниць [3]. При застосуванні метода кінцевих різниць, розв'язування задачі теплопровідності із використанням рівняння (1), застосовано інтегро-інтерполяційний метод [3,4]. Залучення цього методу дозволяє записати рівняння нестационарної теплопровідності у лінеаризованому вигляді із граничними умовами III роду кінцевих різниць, що має вигляд [3,5].

$$\frac{\lambda(\theta_{w_k})\lambda(\theta_{1,k})}{\lambda(\theta_{w_k})+\lambda(\theta_{1,k})} \cdot \frac{\theta_{w_k} - \theta_{1,k}}{\Delta h} + \frac{\Delta h \cdot C_p(\theta_{i,k})\rho(\theta_{i,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (\theta_{1,k} - \theta_{1,k-1}) = \alpha_k (\theta_{1,k} - \theta_{p,k}) \quad (2)$$

де θ_p – температура пожежі, що відповідає стандартному температурному режимові і визначається за формулою стандартного температурного режиму пожежі;

α – коефіцієнт теплообміну;

$\Delta h \sim 0.01 \div 0.005$ м – крок розбиття перерізу;

$\Delta t = 60$ с – часовий крок.

На підставі використання описаного підходу до формулювання й вибору методу розв'язання теплової задачі щодо прогрівання дерев'яної балки із вогнезахисним облицюванням плитами OSB, в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, були складені кінцево-різницева схеми для балок із різними геометричними параметрами перерізів. Кінцево-різницева схема для дерев'яної балки перерізом 70×200 мм із товщиною вогнезахисного облицювання $w = 12$ мм наведена на рис.2 [6].

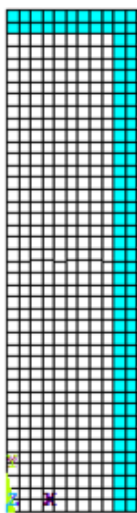


Рисунок 2 – Кінцево-різницева схема перерізу балки 70×200 мм з суцільної деревини із товщиною вогнезахисного облицювання плитами OSB $w = 12$ мм

Для розрахунків потрібно враховувати теплофізичні характеристики деревини, які вибрані згідно із рекомендаціями Eurocode 5 [1]. Також коефіцієнт теплопровідності деревини та її теплоємність залежать від температури, що зображено на графіках рис. 3.

Вузлові точки для побудови графіків на рис. 3 наведені в табл. 1, де також зазначено дані щодо густини деревини.

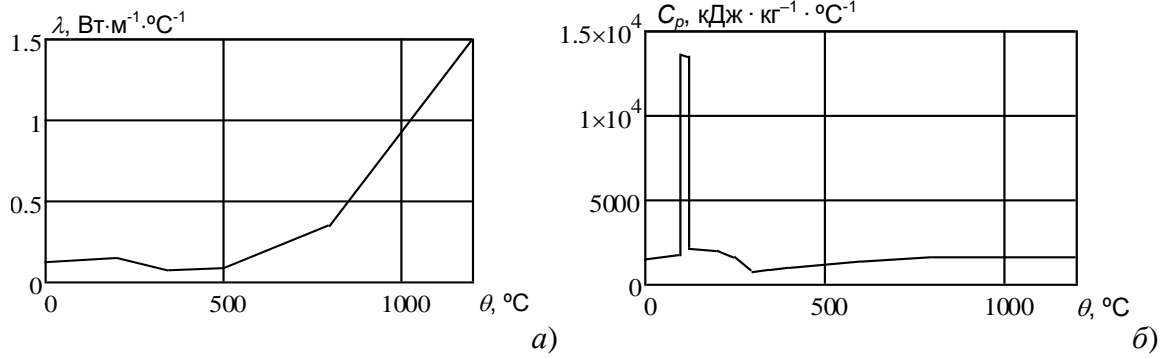


Рисунок 3 – Теплофізичні характеристики деревини: коефіцієнт теплопровідності (а); питома теплоємність (б)

Таблиця 1 - Теплофізичні характеристики деревостружкової плити

Коефіцієнт теплопровідності		Об'ємна питома теплоємність		Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$
$\theta, \text{°C}$	$\lambda(\theta), \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$	$\theta, \text{°C}$	$c_p(\theta)\cdot\rho, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{°C})$	
Деревостружкова плита				
0.15		$2.3 \cdot 10^6$		2300

2. Результати визначення температурних розподілів у дерев'яних балках із вогнезахисним облицюванням.

Після проведення розрахунків були отримані температурні розподіли. Приклади температурних розподілів для балок перерізом 70×200 мм без вогнезахисту під впливом дії високих температур відповідно до стандартного температурного режиму наведені на рис. 4 [7].

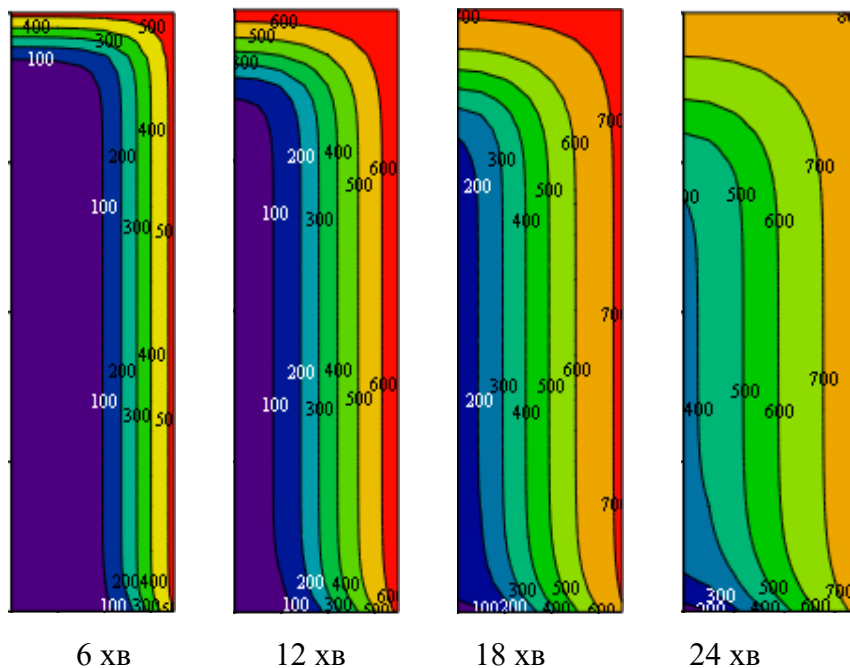


Рисунок 4 – Температурні розподіли (°C) для дерев'яної балки перерізом 70×200 мм без вогнезахисного облицювання під впливом пожежі із стандартним температурним режимом у різні моменти часу

Також виконано подібні розрахунки для дерев'яної балки з перерізом 70×200 з вогнезахисним облицюванням плитами OSB із товщиною $w = 12$ мм та товщиною $w = 24$ мм. Вигляд температурних розподілів для даної балки зображено на рис. 5. та рис. 6.

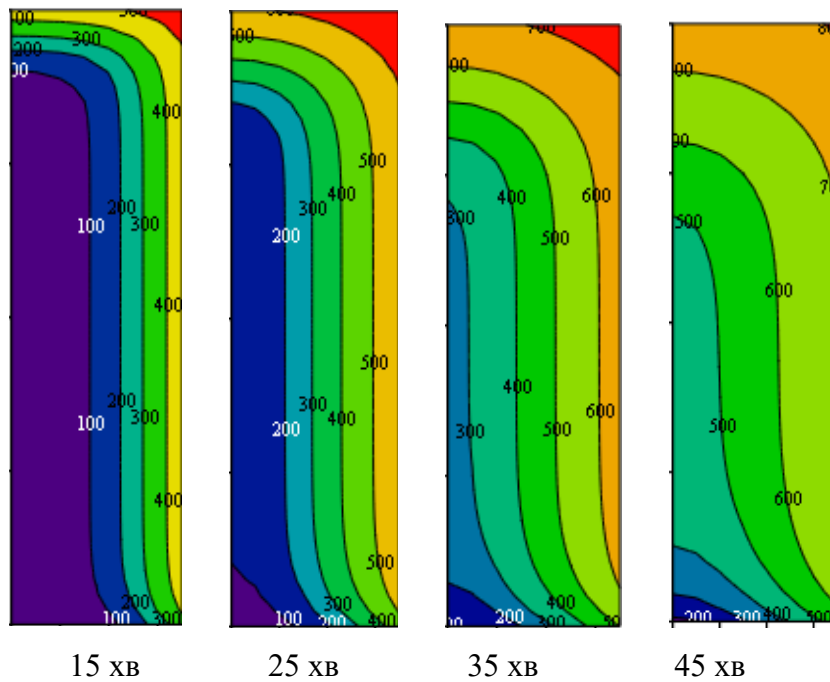


Рисунок 5 – Температурні розподіли (°C) для дерев'яної балки перерізом 70×200 мм з вогнезахисним облицюванням $w = 12$ мм під впливом пожежі із стандартним температурним режимом у різні моменти часу

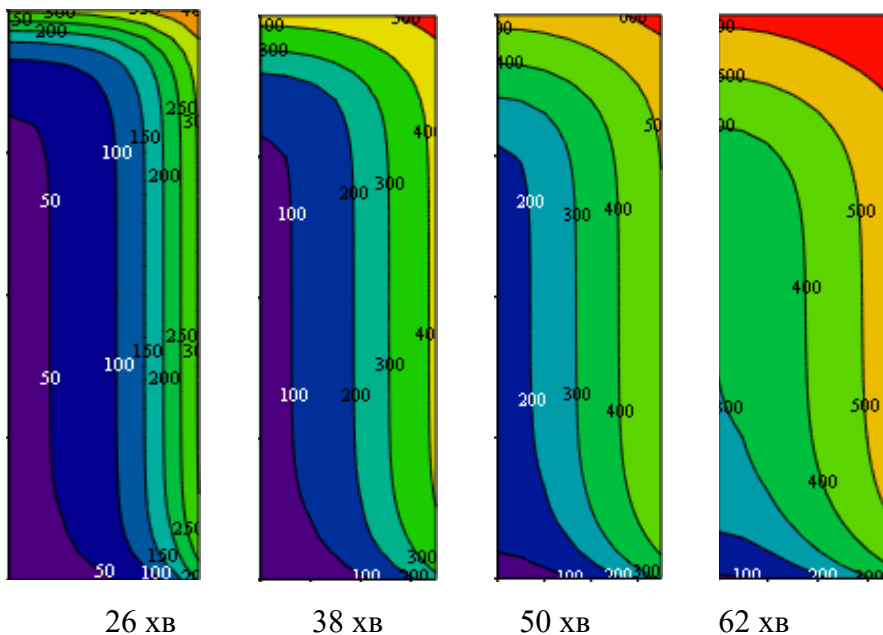


Рисунок 6 – Температурні розподіли (°C) для дерев'яної балки перерізом 70×200 мм із вогнезахисним облицюванням $w = 24$ мм під впливом пожежі із стандартним температурним режимом у різні моменти часу

Порівнюючи отримані дані, що подані на рисунках 4–6, можна відмітити, що температура у перерізі дерев'яної балки без вогнезахисту помітно швидше

поширюється, на відміну від перерізу балки з вогнезахисним облицюванням плитами OSB. Отже, можна сказати, що за якісними показниками, ефективність вогнезахисних систем на основі плит OSB для дерев'яних балок підтверджується.

На основі використання значень температури обуглювання $\theta_{кр} = 200$ °С згідно із роботами [8] були побудовані відповідні ізотерми у різний час впливу стандартного температурного режиму пожежі. На рис. 7 показано розташування даних ізотерм, що отримані за результатами розрахунку відповідно до рис. 4–6.

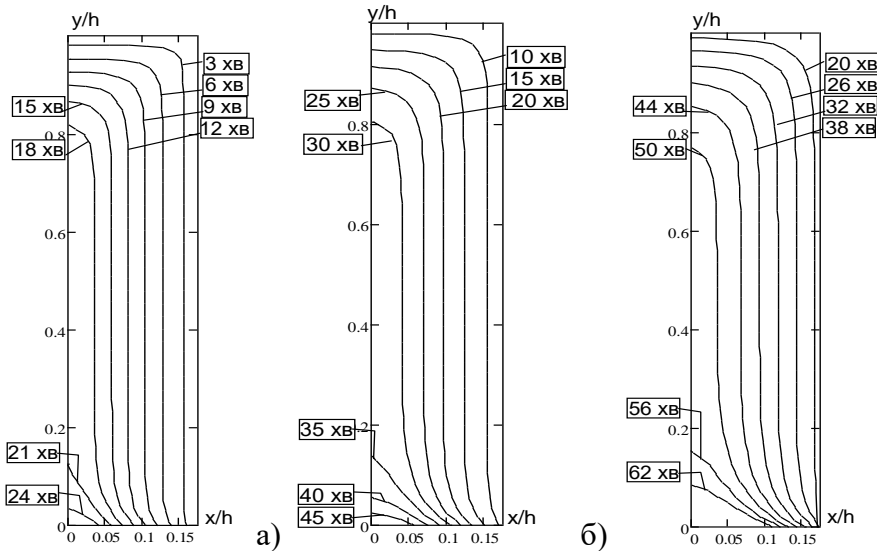


Рисунок 7 – Розташування ізотерм відповідних критичній температурі $\theta_{кр} = 200$ °С, у перерізі дерев'яної балки у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: а) без вогнезахисту; б) із вогнезахисним облицюванням $w = 12$ мм; в) із вогнезахисним облицюванням $w = 24$ мм

На рис. 7 положення ізотерм позначені в координатах відносно найбільшого геометричного розміру перерізу (висоти). Аналіз розподілення ізотерм, наведених на рис. 6 показує, що їхня конфігурація у перерізах подібна одна до одної і може бути описана параметрично. При описанні зон обуглювання перерізів дерев'яних балок отримані ізотерми приймаємо як припущення про те, що їх можна використати для окреслення контурів даних зон.

У результаті проведених досліджень була розв'язана задача щодо виявлення закономірностей прогрівання перерізів дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням плитами OSB, а також виявлено зміни геометричних параметрів їхньої зони обуглювання як основу для розрахункового визначення проєктних даних щодо міцності даних дерев'яних балок.

Висновки. На основі проведених досліджень була розроблена методика інтерполяції температурних розподілів всередині зразків-фрагментів дерев'яної балки і розроблена методика математичного описання геометричної форми зони обуглювання у перерізі дерев'яної балки без вогнезахисту та з вогнезахисним облицюванням на основі OSB плит. Дана методика розрахунку температурних розподілів по перерізу дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням плитами OSB та виконані відповідні розрахунки для балки перерізом 70×200 мм без вогнезахисту та з вогнезахисним облицюванням товщиною 12 мм та 24 мм під впливом стандартного температурного режиму пожежі. У результаті чого було доведено, що вогнезахисне облицювання має помітний вогнезахисний ефект, оскільки швидкість поширення температури знижується у 1,5-2,5 рази за наявності даного вогнезахисту.

Перспективи подальших досліджень. Результати роботи стануть передумовою для подальших досліджень в частині визначення несучої здатності та оцінки вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі. Аналітичний опис ліній контуру обвугленої зони дозволяє отримати геометричні характеристики перерізів залишеної цілої частини дерев'яних балок різної геометричної конфігурації, з різною товщиною вогнезахисного облицювання, що можна використати для майбутнього розрахунку міцності відповідних дерев'яних балок.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012 [Чинний від 01.07.2013] Мінрегіонбуду України від 21.12.2012 р. № 652 – 90 с – (Національний стандарт України).
2. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT).
3. Поздєєв С., Некора О., Змага М., Змага Я., Новгородченко А. Результати дослідження швидкості обвуглювання фрагментів дерев'яних балок з облицюванням двох типів. - Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Том 7 № 1 (2023). С. 119-130.
4. Wolgast R. Flame retarding building materials / VFDB Zeitschrift Forschung and Technik in Brandschutz, 10 (2,4) (Stuttgart).
5. Hearn D., Baker M. P. Computer graphics and the OpenGL standard. Williams, 2005. 1168 p.
6. ДСТУ Б В.1.1-4-98 Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги.[Чинний 1998-10-28]. – К.: Держбуд, 1998. – 44 с. – (Державний стандарт України), Київ - 1999.
7. Новгородченко А. Визначення температурних розподілень дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням. / С. Поздєєв, А. Новгородченко, С. Федченко, І. Неділько // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. – С. 200-202.
8. Demeshok V. Calculation method for evaluating the fire resistance of timber slabs with use the finite elements method / Demeshok V., Zalevs'ka A., Lutsenko Yu. Tyshchenko O. // XVIII International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics» - A collective monograph edited by Jarosiaw Borysa, Dorota Musiai Series: Monografie Nr 68. Czkochowa 2017. С. 405-410.

REFERENCES

1. Eurocode 5. Design of wooden structures. Part 1-2. General rules. Calculation of structures for fire resistance (EN 1995-1-2:2004, IDT) DSTU-NB EN 1995-1-2:2012 [Valid from 07.01.2013] Ministry of Regional Construction of Ukraine from 12.21.2012 No. 652. 90 p. (National Standard of Ukraine).
2. Eurocode 1. Actions on structures - Part 1-4. General actions - Wind actions (EN 1991-1-2:2002, IDT).
3. Pozdieiev S., Nekora O. Zmaga Y., Zmaga N., Novhorodchenko A. results of researching the rate of carbonization of fragments of wooden beams with two types of cladding.
4. Wolgast R. Flame retarding building materials / VFDB Zeitschrift Forschung and Technik in Brandschutz, 10 (2,4) (Stuttgart).
5. Hearn D., Baker M. P. Computer graphics and the OpenGL standard. Williams, 2005. — 1168 p.

6. Forecasting the Behavior of Steel Beams with Corrugated Walls Under the Thermal Exposure of a Fire. Stanislav Sidnei, Taras Shnal, Petro Kholod, Serhii Pozdieiev / International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering/ EcoComfort 2022: Proceedings of EcoComfort 2022 pp 388–398.

7. Improvement of the assessment method for fire resistance of steel structures in the temperature regime of fire under realistic conditions Shnal T., Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S./ Materials Science Forum, 2020, 1006 MSF, p. 107–116.

8. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire» S. Sidnei, S. Pozdieiev, O. Nekora, T. Kryshtal. 7th International Scientific Conference//Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings”/ MATEC Web of Conferences 230, 02026 (2018).

9. ANSYS, Inc.: ANSYS Structural Analysis Guide, ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA 2004.

10. Civil code of Ukraine.

11. State building regulations B.2.2-5: 2023 “Protective structures civil protection”.

12. DSTU-H B EN 1993-1-2:2012 Projection steel structures of steel structures. Part 1-2. Terms. Calculation of structures for fire resistance.– C.: Ukrarchbuildinform, 2012. – 77 p.

Serhii POZDIEIEV, doctor of technical sciences, professor

(ORCID: 0000-0002-9085-0513),

Alina NOVHORODCHENKO Ph.D (ORCID: 0000-0003-2347-093X),

Yana ZMAHA, PhD in technical sciences, associate professor

(ORCID: 0000-0001-8389-9709),

Vitaly NOVHORODCHENKO adjunct (ORCID: 0009-0009-6484-9242),

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

RESEARCH OF TEMPERATURE DISTRIBUTIONS IN THE CROSS-SECTIONS OF WOODEN BEAMS WITH FIREPROOF FACING

Abstract. *The article presents the results calculation of temperature distributions inside the cross-section of a wooden beam with fireproof facing. The subject of research is the influence of structural parameters of wooden beams on fire resistance under conditions of thermal action of high temperatures during a fire. The purpose is to reveal the regularities of heating the sections of wooden beams with fireproof facing with OSB plates, as changes in the geometric parameters of their carbonization zone under the conditions of the standard fire temperature regime to estimate their fire resistance limit. To fulfill this goal, the following research tasks: on the basis of the conducted fire tests, develop a method of interpolation of temperature distributions inside samples-fragments of a wooden beam; to develop a method of mathematical description of the geometric shape of the carbonization zone in the cross-section of a wooden beam without fire protection and with fireproof facing based on OSB plates. To develop a methodology for calculating temperature distributions inside the cross-section of a wooden beam with fireproof facing and tabular, thermo physical methods and mathematical modeling were used to construct contour lines of the charring zone. The scientific novelty of the study consists in revealing the regularities that establish the dependence of the configuration of the charring zone of wooden beams on the structural parameters their fireproof facing. the influence of the standard fire temperature regime, as a scientific basis for improving the calculated assessment of their fire resistance. After the calculations, the main result was obtained which allow you to determine the geometric configuration of the non-carbonized part of the cross section of the beam and determine its bearing capacity using the real geometric characteristics of the non-charred section of the wooden beam.*

Keywords: *Wooden Beam, Fireproof Facing, Temperature Distribution, Mathematical Modeling, Fire Resistance.*