

РОЗРАХУНОК НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗГИНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА МЕТОДИКОЮ ЄВРОКОДУ 5

Олег ФЕСЕНКО¹, Віра КОЛЯКОВА², Євген ДМИТРЕНКО³, Дарина МОМОТЮК⁴,

^{1,2} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

^{1,3,4} Національний університет біоресурсів і природокористування України
15, вул. Героїв Оборони, Київ, Україна, 03041

¹oleg_for@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8154-2239>

²koliakova.vm@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-6879-8520>

³zdmirenko26@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9737-943X>

⁴dmomotyuk@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8445-930X>

Анотація. Стаття містить результати розрахунку на вогнестійкість дерев'яних згинальних конструкцій спрощеним методом приведення перерізу та уточненим методом шляхом розв'язання диференційного рівняння нестационарної теплопровідності.

Розрахунок дерев'яних згинальних елементів перекриття на вогнестійкість було виконано за методикою, що наведена у Єврокодi 5, частина 1-2.

Розрахунок на вогнестійкість методом приведення перерізу було виконано за ознакою втрати несучої здатності та за ознакою втрати теплоізолювальної здатності.

За результатами розрахунку методом приведення перерізу було визначено час руйнування вогнезахисту і час початку обвуглювання елементів перекриття.

Межа вогнестійкості перекриття за ознакою втрати теплоізолювальної здатності була визначена як сума значень межі вогнестійкості усіх шарів і елементів конструкції.

Теплофізичний розрахунок вогнестійкості дерев'яних балок перекриття було виконано методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу Ansys Mechanical 2021 R1 Academic.

Залежності теплофізичних властивостей деревини – питомої теплоємності, коефіцієнта теплопровідності та густини від підвищених температур були прийняті відповідно до стандарту ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2.

© О.ФЕСЕНКО, В.КОЛЯКОВА,
Є.ДМИТРЕНКО, Д.МОМОТЮК, 2022



Олег ФЕСЕНКО

доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій,
к.т.н.



Віра КОЛЯКОВА

доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій,
к.т.н., доцент



Євген ДМИТРЕНКО

старший викладач кафедри будівництва,
к.т.н.



Дарина МОМОТЮК

студентка 3-го року навчання

Результати теплофізичного розрахунку вогнестійкості були отримані для трьох типів поперечних перерізів, для двох варіантів нагрівання під час пожежі – знизу і з трьох сторін протягом 45 і 60 хв.

Ключові слова. Вогнестійкість; дерев'яні конструкції; приведений переріз; теплофізичний розрахунок.

ВСТУП

Останніми роками значний суспільний резонанс в Україні викликали пожежі у громадських будівлях, які супроводжувалися втратами життя, зокрема дітей і людей похилого віку. Одними з найбільш трагічних можна назвати пожежу у дитячому таборі «Вікторія» (м. Одеса, 2017 рік) [1], пожежу в Будинку Асвадурава (м. Одеса, 2019 рік) [2], пожежу у приватному будинку для літніх людей «Золотий час» (м. Харків, 2021 рік) [3]. Серед імовірних причин пожеж були розглянуті такі:

- підпал (занесення стороннього вогню);
- необережне поводження з вогнем у побуті і електроприладами або замикання електромережі;
- відсутність протипожежних заходів або недотримання вимог пожежної безпеки.

Відповідно до Закону України «Про надання будівельної продукції на ринку» пожежна безпека є другою основною вимогою до будівель і споруд [4]. Будівлі або споруди повинні бути запроектовані і побудовані таким чином, щоб у разі виникнення пожежі:

- протягом визначеного проміжку часу зберігалася несуча здатність конструкцій;
- було обмежено виникнення та поширення вогню і диму всередині будівлі чи споруди;
- було обмежено поширення вогню на сусідні будівлі і споруди;
- була забезпечена можливість евакуації людей або їх порятунку в інший спосіб;
- враховувалася безпека рятувальників.

Одним із базових елементів гарантування пожежної безпеки у будівництві є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Згідно з вимогами частин Будівельних Єврокодів, що встановлюють правила для розрахунку конструкцій на вогнестійкість [5-7], заходи для забезпечення вогнестійкості конструкцій поділяють на активні (спринклерні системи, сигналізація,

автоматичне оповіщення про небезпеку, пожежно-рятувальні підрозділи тощо) та пасивні (конструктивні заходи, вогнезахист та ін.).

Деревина, як конструкційний матеріал, має ряд суттєвих переваг (екологічність, відновлюваність, естетичність, невисока маса), які часто нівелюються одним характерним недоліком – горючістю. Чинні ДБН В.1.1-7:2016 [8] чітко обмежують сферу застосування горючих матеріалів у будівництві. Таким чином, дерев'яні конструкції часто потребують улаштування їх вогнезахисту.

Єврокод 5, частина 1-2 [7], встановлює вимоги до розрахунку дерев'яних конструкцій на вогнестійкість та передбачає конструктивні заходи щодо гарантування пожежної безпеки цих конструкцій. Застосування розрахункових методів оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій за Єврокод 5 є значно менш трудо- та матеріаломістким порівняно із експериментальними натурними методами випробування.

Удосконалення розрахункових методів оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій, а також їх широке впровадження у практику проектування будівель і споруд, дозволить суттєво підвищити рівень пожежної безпеки у будівництві.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідженням вогнестійкості будівельних конструкцій, зокрема дерев'яних, займалися такі українські вчені як Демчина Б.Г., Коляков М.Й., Круковський П.В., Михайловський Д.В., Пелех А.Б., Поклонський В.Г., Тарасюк В.Г., Фомін С.Л., Шналь Т.П. та інші, а також зарубіжні вчені Peter J. Moss, Thomas Gernay, Massimo Fragiaco, Alar Just, J. König, P. W. C. Lau, R. White, I. Van Zeeland та інші [9-19].

Вогнестійкість дерев'яних конструкцій, як і будь яких інших, може бути оцінена аналітично (за розрахунками) або шляхом проведення випробувань згідно зі стандартами [20, 21]. Розрахункові методи є більш інноваційними і менш матеріаломісткими, однак

їх широке застосування неможливе без наявної бази результатів випробувань.

Впровадження розрахункових методів потребує даних щодо характеристик матеріалів, наприклад, деревини різних сортів і порід, деревинних матеріалів тощо, за високих температур. Зокрема, необхідними є експериментальні залежності теплофізичних (теплопровідність, теплоємність) та механічних характеристик (міцність, модуль пружності) від температури.

Такі експериментальні дані наявні у Єврокод 5, частина 1-2, який впроваджено в Україні як гармонізований національний стандарт ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012 [7]. Водночас поява та застосування нових засобів вогнезахисту деревини потребує їх дослідження та визначення пожежних характеристик.

Застосування розрахункових методів оцінки вогнестійкості пов'язане із впровадженням новітніх програмних обчислювальних комплексів, зокрема таких як Ліра-САПР, Ansys Mechanical, Comsol Multi-physics та ін.

Не менш важливим для забезпечення вогнестійкості дерев'яних конструкцій, як і гарантування пожежної безпеки в цілому, є рівень кваліфікації виконавців, так званий «людський чинник», які будуть здійснювати проектування вогнезахисту та виконувати його безпосередньо на майданчику будівництва.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета та завдання дослідження полягає в розрахунковій оцінці теплового і напружено-деформованого стану дерев'яних згинальних конструкцій за умов вогневого впливу пожежі, що розвивається за стандартним температурним режимом.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ЗА ЄВРОКОД 5

Метою розрахунку на вогнестійкість будь-якої будівельної конструкції є визначення її фактичної межі вогнестійкості. За межею вогнестійкості конструкція може бути віднесена до певного класу вогнестійкості. Ступінь вогнестійкості будівлі або споруди визначається класами вогнестійкості конструкцій та межею поширення вогню по цих конструкціях [8].

Єврокод 5, частина 1-2, а саме гармонізований національний стандарт ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012, стосується проектування дерев'яних конструкцій на випадок аварійних ситуацій під час пожежі. Цей стандарт застосовують до конструкцій, що мають виконувати певні функції під час пожежі [7]:

- запобігання передчасному руйнуванню конструкції (несуча здатність);
- обмеження поширення вогню (полум'я, гарячих газів, надлишкового нагрівання) за межі визначених зон (огороджувальна здатність).

Методи оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій поділяють на спрощені та уточнені.

Спрощені методи розрахунку несучої здатності дерев'яних конструкцій під час пожежі базуються на методі приведенного перерізу. Сутність цього методу полягає у визначенні залишкової несучої здатності приведенного перерізу конструкції, який отримано з урахуванням швидкості глибини обвуглювання деревини.

Спрощені методи розрахунку огорожувальної здатності дерев'яних конструкцій передбачають визначення сумарного часу руйнування усіх шарів конструкції, що призводить до втрати нею цілісності або теплоізолювальної здатності.

В цілому, спрощені методи розрахунку дерев'яних конструкцій не потребують застосування програмних обчислювальних комплексів. Однак сфера їх застосування обмежується окремими конструкціями (балка, колона, стіна тощо).

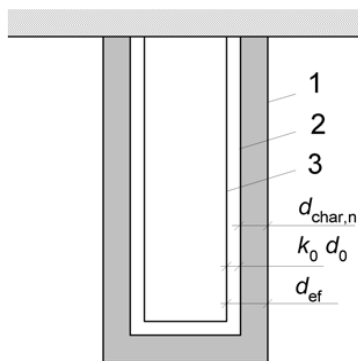
Уточнені методи розрахунку для визначення несучої та огорожувальної здатності дерев'яних конструкцій забезпечують більш реалістичний їх аналіз, порівняно зі спроще-

ними методами. Вони базуються на фундаментальних фізичних уявленнях, що ведуть до отримання найбільш достовірних даних про очікувану роботу відповідного конструктивного елемента під час пожежі.

Уточнені моделі можуть бути використані як для розрахунку окремих конструктивних елементів, так і частин конструктивної системи або цілих конструктивних систем.

Уточнені методи розрахунку дерев'яних конструкцій на вогнестійкість застосовуються для таких цілей:

- визначення глибини обуглювання;
- визначення збільшення та розподілення температури в елементах конструкцій (теплофізичний розрахунок);
- оцінки механічної роботи конструкцій або будь-якої частини (статичний розрахунок).



- робоча глибина обуглювання

-

$$d_{ef} = d_{ef} + k_0 \cdot d_0, \quad (1)$$

де $d_0 = 7$ мм;

k_0 – коефіцієнт (п. 4.2.2.4 [7])

- умовна розрахункова глибина обуглювання

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t, \text{ мм} \quad (2)$$

де β_n – умовна розрахункова швидкість обуглювання, мм/хв;

t – тривалість вогневого впливу,

де час початку обуглювання

$$t_{ch} = 2,8 \cdot h_p - 14, \text{ хв} \quad (3)$$

де h_p – товщина вогнезахисної панелі, мм;

Уточнені методи теплофізичного розрахунку вогнестійкості ґрунтуються на теорії теплообміну. При теплофізичному розрахунку враховують зміну теплофізичних та термомеханічних властивостей матеріалів залежно від зміни температури. Температура навколишнього середовища приймається 20 °С.

Статичний розрахунок вогнестійкості дерев'яних конструкцій виконують з урахуванням впливу нелінійних характеристик матеріалів.

Розрахунок на вогнестійкість дерев'яних конструкцій перекриття методом *приведеного поперечного перерізу* виконують за таким алгоритмом [7]:

1. Визначення залишкового поперечного перерізу (рис. 1):

Рис.1. Залишковий і робочий поперечний перерізи дерев'яного елемента:

1 – початкова поверхня елемента;

2 – межа залишкового поперечного перерізу;

3 – межа робочого поперечного перерізу

Fig.1. Residual and design cross-section of timber element:

1 - initial surface of member;

2 - border of residual cross-section;

3 – border of effective cross-section

- час руйнування гіпсокартонних панелей

$$t_{ch} = 2,8 \cdot h_p - 11, \text{ хв} \quad (4)$$

- час, коли глибина обуглювання дорівнює меншому зі значень глибини елемента без вогнезахисту або 25 мм, за умови, що

$t_{ch} < t_f$

$$t_a = \frac{25 - (t_r - t_{ch})k_2\beta_n}{k_3\beta_n} + t_f \quad (5)$$

де $k_2 = 1 - 0,018h_p$, $k_3 = 2$.

2. Визначення рівня зниження характеристик міцності деревини:

- коефіцієнт зміни міцності дерев'яних елементів під час пожежі $k_{mod,fi} = 1,0$.

3. Перевірка несучої здатності дерев'яної конструкції перекриття під час пожежі:

- розрахункова міцність під час пожежі

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \text{ МПа} \quad (6)$$

- 20 %-й квантиль міцності

$$f_{20} = k_f \cdot f_k, \quad (7)$$

де k_{fi} – коефіцієнт (табл. 2.1 [7]),

$\gamma_{M,fi}$ – коефіцієнт надійності для деревини під час пожежі;

- розрахункове значення несучої здатності

$$R_{d,t,fi} = \eta \frac{R_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (8)$$

- умова забезпечення несучої здатності під час пожежі:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}, \quad (9)$$

де $E_{d,fi}$ – розрахунковий навантажувальний ефект під час пожежі;
 $R_{d,t,fi}$ – відповідний розрахунковий опір під час пожежі.

Для огорожувальних елементів дерев'яних конструкцій має виконуватися така умова (п. Е.1.4 [7]):

$$t_{ins} > t_{req} \quad (10)$$

де t_{ins} – межа вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності;

t_{req} – нормована межа вогнестійкості для огорожувальної здатності конструкції.

Значення t_{ins} розраховують як суму значень для окремих шарів огорожувальної конструкції (рис. 2)

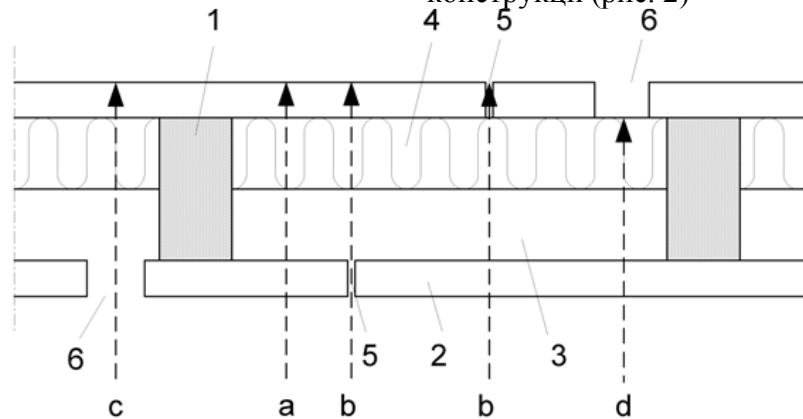


Рис.2. Шляхи теплообміну через огорожувальну конструкцію

1 – елемент дерев'яної рами;

2 – панель;

3 – незаповнена порожнина;

4 – ізоляція порожнини;

5 – стик панелей, не захищений дошкою, стійкою каркасу стіни або балкою каркасу перекриття;

6 – місце прокладання комунікацій;

a-d – шляхи теплообміну

Fig.2. Heat transfer paths through a separating construction

1 - timber frame member;

2 - panel;

3 - void cavity;

4 - cavity insulation;

5 - panel joint not being backed with a batten, stud or joist;

6 - position of services;

a-d - heat transfer paths

$$t_{ins} = \sum_i t_{ins,o,i} \cdot k_{pos} \cdot k_j, \quad (11)$$

де $t_{ins,o,i}$ – базисне значення часу настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності “i”-го шару, хв, див. Е.2.2 [7];

k_{pos} – коефіцієнт розташування;

k_j – коефіцієнт з'єднання.

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ МЕТОДОМ ПРИВЕДЕНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Розрахунок на вогнестійкість було виконано для дерев'яних конструкцій перекриття житлового будинку, що запроєктований за каркасно-модульною технологією [12].

Перекриття модуля являють собою панелі, каркас яких виконаний із дерев'яних балок з кроком 0,4 м.

Розміри перерізу балок основи – 190x40 мм, балок перекриття – 140x40 мм. Панель основи модуля знизу обшита одним гіпсокартонним листом (ГКЛ) товщиною 10 мм, а зверху – орієнтовано-стружковою плитою (ОСП) товщиною 18 мм.

Панелі перекриття модуля обшита знизу двома шарами ГКЛ товщиною 12 мм кожен. Панелі заповнені утеплювачем. Опорні рами основи і перекриття модулів виготовлені з елементів складеного перерізу загальною висотою 230 мм і 140 мм відповідно. Загальна товщина міжповерхових перекриттів будинку становить 412 мм.

Відповідно до вимог ДБН В.1.1-7 [8] і ДБН В.2.2-15 [22] ступінь вогнестійкості дерев'яного каркасно-модульного житлового будинку висотою до п'яти поверхів – III. Згідно з ДБН В.1.1-7 [8] клас вогнестійкості

$$t_{a,1} = \frac{25 - (t_r - t_{ch}) \cdot k_2 \cdot \beta_n}{k_3 \cdot \beta_n} + t_f = \frac{25 - (45 - 36,4) \cdot 0,784 \cdot 0,8}{2 \cdot 0,8} + 39,6 = 51,7 \text{ хв} > t = 45 \text{ хв}$$

$$\text{де } k_2 = 1 - 0,018h_p = 1 - 0,018 \cdot 12 = 0,784, \\ k_3 = 2.$$

4. Час початку обвуглювання елементів основи модуля

конструкцій перекриття будинку III-го ступеня вогнестійкості має становити REI 45.

Розрахунок на вогнестійкість за ознакою втрати несучої здатності (R)

Тривалість вогневого впливу на перекриття (рис. 3) знизу прийнято $t = 45$ хв за стандартним температурним режимом [12].

1. Час початку обвуглювання елементів перекриття модуля

$$t_{ch} = 2,8 \cdot h_p - 14 = 2,8 \cdot 1,5 \cdot 12 - 14 = 36,4 \text{ хв} < t = 45 \text{ хв}$$

2. Час руйнування панелі перекриття модуля

$$t_{ch} = 2,8 \cdot h_p - 11 = 2,8 \cdot 1,5 \cdot 12 - 11 = 39,4 \text{ хв} < t = 45 \text{ хв}$$



Рис.3. Поперечний переріз перекриття будинку

Fig.3. Cross-section of the floor

3. Час, коли глибина обвуглювання дорівнює меншому зі значень глибини елемента без вогнезахисту або 25 мм

$$t_{ch,2} = 2,8 \cdot h_p - 14 = 2,8 \cdot 12 - 14 = 19,6 \text{ хв} > t - t_{f,1} = 45 - 39,4 = 5,6 \text{ хв}$$

5. Час руйнування панелі основи модуля
 $t_{f,2} = 2,8 \cdot h_p - 11 = 2,8 \cdot 12 - 11 = 22,6$ хв $> t -$
 $t_{f,1} = 45 - 39,4 = 5,6$ хв.

Час початку обвуглювання елементів панелі основи модуля і час руйнування панелі основи модуля менші за тривалість прямого вогневого впливу на основу модуля. Таким

$$t_{ins} = \sum_i t_{ins,0,i} \cdot k_{pos} \cdot k_j = 0,8 \cdot (t_{ins,0,ГКЛ,1} \cdot k_{pos} \cdot k_j + t_{ins,0,ГКЛ,2} \cdot k_{pos} \cdot k_j + t_{ins,0,пор,1} \cdot k_{pos} \cdot k_j + t_{ins,0,пор,2} \cdot k_{pos} \cdot k_j + t_{ins,0,ОСП} \cdot k_{pos} \cdot k_j) + t_{ins,0,ГКЛ,3} \cdot k_{pos} \cdot k_j + t_{ins,0,пор,2} \cdot k_{pos} \cdot k_j + t_{ins,0,ОСП} \cdot k_{pos} \cdot k_j;$$

$$t_{ins} = 0,8 \cdot (1,4 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 1 + 1,4 \cdot 12 \cdot 0,8 \cdot 1 + 5 \cdot 11 + 1,4 \cdot 12 \cdot 0,8 \cdot 1 + 5 \cdot 1 \cdot 1 + 1,1 \cdot 18 \cdot 0,6 \cdot 1) =$$

$$= 52,45 \text{ хв} > t_{req} = 45 \text{ хв},$$

де $t_{ins,0,ГКЛ} = 1,4 h_p$ – базисне значення часу настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності гіпсокартонних листів, хв [7];

$t_{ins,0,ОСП} = 1,1 h_p$ – для деревостружкових плит і деревинно-волокнистих плит, хв [7];

$t_{ins,0,пор} = 5$ хв – для незаповнених порожнин;

k_{pos} – коефіцієнти розташування [7];

k_j – коефіцієнти з'єднання [7].

Таким чином, теплоізолювальна здатність перекриття будинку протягом вогневого впливу тривалістю 45 хв забезпечена. Відповідно до п. Е.1.2 [7] цілісність (граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності Е) забезпечена, якщо забезпечені вимоги щодо теплоізолювальної здатності, а панелі залишаються закріплені до дерев'яної рами з необігріваної поверхні. За результатами розрахунку клас вогнестійкості перекриття становить щонайменше REI 45.

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО РОЗРАХУНКУ УТОЧНЕНИМИ МЕТОДАМИ

Теплофізичний розрахунок включає відповідні теплові впливи, що визначені в ДБН В 1.2-7 [23], ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2 [24], а також залежні від температури властивості деревини.

Для розгляду теплового стану конструкції в умовах пожежі враховують такі теплові процеси, як теплопровідність, конвекційний і радіаційний теплообмін [24]. Внутрішні поверхні приміщення, які обтікає гаряче повітря, сприймають тепло завдяки спільному

чином, несуча здатність перекриття будинку протягом вогневого впливу тривалістю 45 хв забезпечена.

Розрахунок на вогнестійкість за ознакою втрати теплоізолювальної здатності (I)

Межу вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності t_{ins} було визначено за формулою (11):

конвекційному і радіаційному теплообміну. В об'ємі конструкції тепло поширюється від обігріваної поверхні до поверхні охолодження завдяки теплопровідності, а зовнішні поверхні конструкції віддають тепло в повітря шляхом радіаційно-конвекційного теплообміну [23, 24].

Умови радіаційно-конвекційного нагрівання від гарячих газів до обігріваних поверхонь і охолодження конструкцій у повітря прийняті такими, що становлять [24]:

- коефіцієнт тепловіддачі від гарячих газів до поверхні конструкції – 25 Вт/(м² К);

- коефіцієнт тепловіддачі від поверхні конструкції в повітря – 5,0 Вт/(м² К).

Значення коефіцієнту теплового випромінювання приймають такими, що становлять [7, 22]:

- $\epsilon_m = 0,8$ – для незахищених поверхонь дерев'яних конструкцій;

- $\epsilon_f = 1,0$ – для полум'я, якщо відсутнє обґрунтування щодо іншого значення цього коефіцієнту.

Теплофізичні властивості деревини за підвищених температур прийняті відповідно до стандарту ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2 [7]. Залежності питомої теплоємності, коефіцієнта

теплопровідності та густини від температури наведені на рисунках 4-6. Теплофізичний розрахунок вогнестій-кості дерев'яних балок перекриття було виконано методом

скінченних елементів за допомогою програмного комплексу Ansys Mechanical 2021 R1 Academic, який вільно поширюється на сайті розробника програмного забезпечення і призначений для наукових досліджень

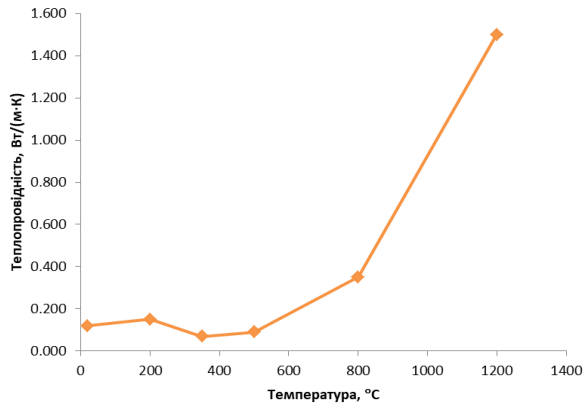


Рис. 4. Залежність теплопровідності деревини від температури

Fig. 4. Temperature-thermal conductivity relationship for wood

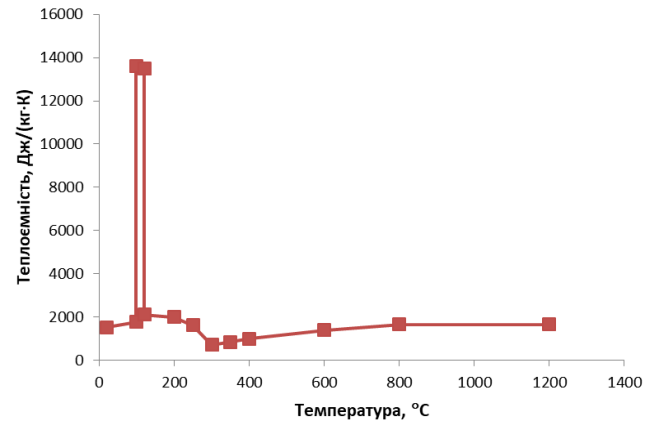


Рис. 5. Залежність питомої теплоємності деревини від температури

Fig. 5. Temperature-specific heat relationship for wood

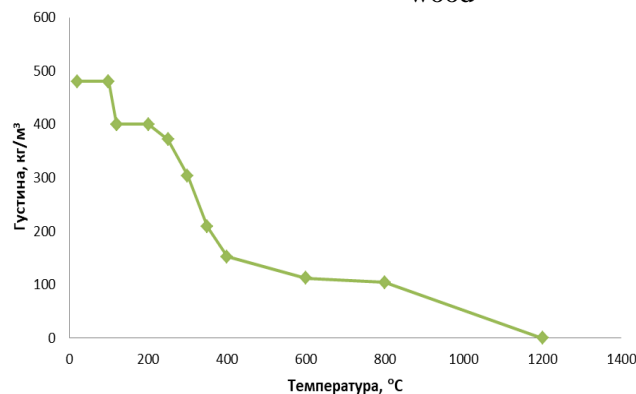


Рис. 6. Залежність густини деревини від температури

Fig. 6. Temperature-density ratio relationship for wood

Для розрахунку розподілу температури в поперечному перерізі конструкції перекриття для часу 45 хв вогневого впливу за стандартним температурним режимом була прийнята скінченно-елементна математична модель нестационарної теплопровідності, яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до обігрівних поверхонь, кондуктивний теплообмін у цих конструкціях та радіаційно-конвективний теплообмін.

Розподіл температури в перерізі конструкції визначають шляхом розв'язання диференційного рівняння нестационарної теплопровідності [14]:

$$c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (12)$$

де x, y, z – координати в конструкції, м;

t – час, с;

θ – температура в конструкції, °C;

λ – теплопровідність матеріалу, Вт/(м·К);

c_p – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);

ρ – густина матеріалу, кг/м³.

Значення теплофізичних характеристики деревини були прийняті згідно з ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012 [7].

Граничні умови для розрахункової моделі дерев'яних балок перекриття були прийняті такими [7, 24]:

- коефіцієнт тепловіддачі: внутрішньої поверхні – 25 Вт/(м²·К); зовнішньої поверхні – 10 Вт/(м²·К);
- температура зовнішньої поверхні – 20 °С.

Прийнятий стандартний температурний режим пожежі:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \lg(8 \cdot t + 1) \quad (13)$$

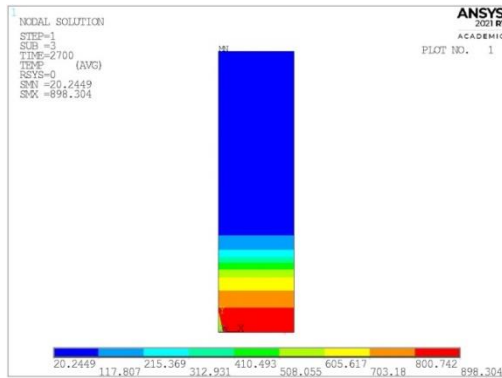
де θ_g – температура газового середовища, °С;

θ_0 – початкова температура середовища,

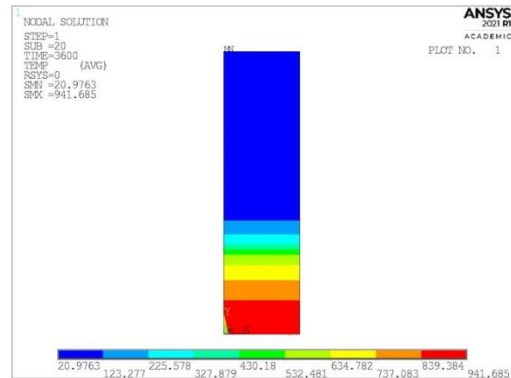
°С; t – тривалість вогневого впливу пожежі, хв.

Розрахунки розподілу температури в перерізі балок за даною математичною моделлю були виконані із застосуванням чисельного методу розв'язання за неявною кінцево-різницевою схемою апроксимації.

Розрахунки було виконано для трьох поперечних перерізів – 150x40 мм, 200x50 мм, 250x100 мм, для двох варіантів нагрівання під час пожежі – знизу і з трьох сторін протягом 45 і 60 хв. Результати теплофізичного розрахунку розподілу температури у поперечних перерізах дерев'яних балок перекриття наведено на рис. 7-12.



а



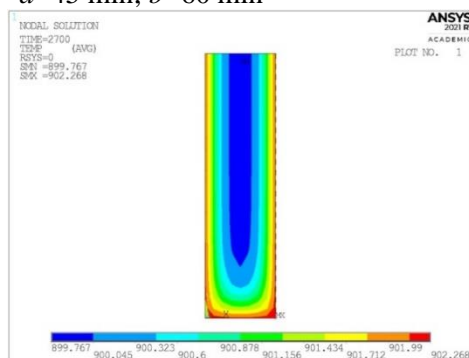
б

Рис.7. Розподіл температури балки 150x40 мм при односторонньому вогневому впливі тривалістю:

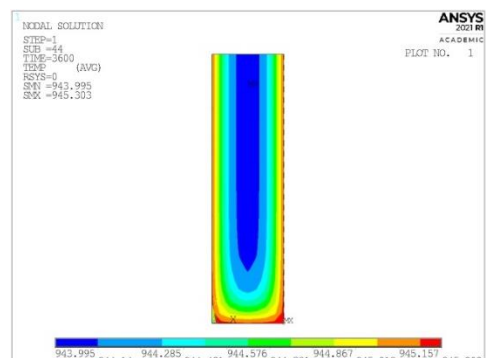
а- 45 хв; б- 60 хв

Fig.7. Thermal distribution in beam cross-section 150x40 mm after the one-side fire exposure during:

а- 45 min; б- 60 min



а



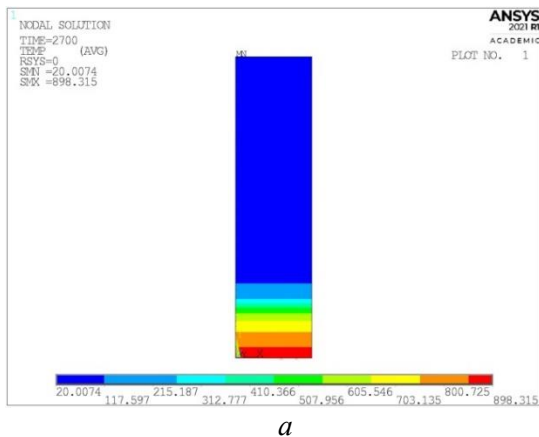
б

Рис. 8. Розподіл температури балки 150x40 мм при тристоронньому вогневому впливі тривалістю:

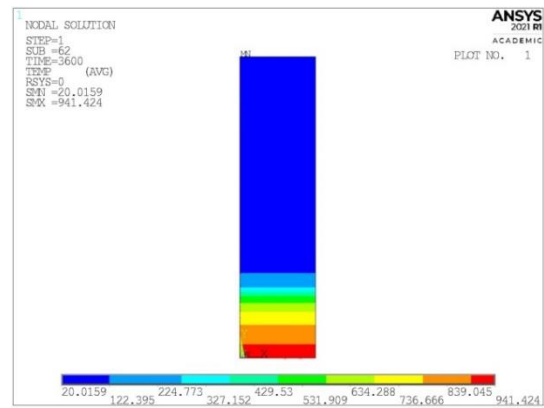
а- 45 хв; б- 60 хв

Fig. 8. Thermal distribution in beam cross-section 150x40 mm after the three-side fire exposure:

а- during 45 min; б- during 60 min



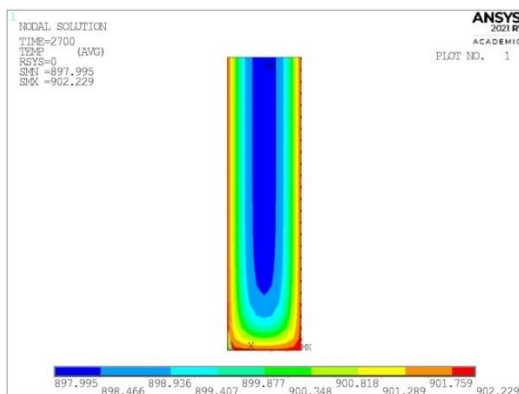
а



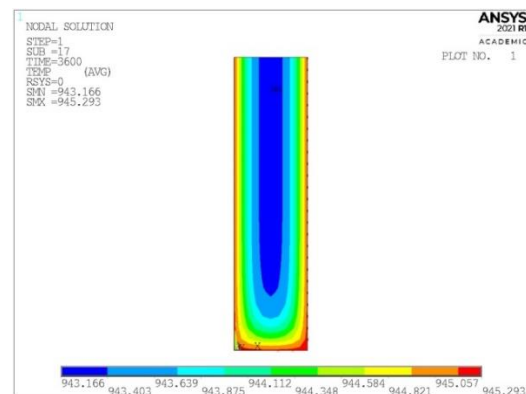
б

Рис. 9. Розподіл температури балки 200x50 мм при односторонньому вогневому впливі протягом:
а- 45 хв; б- 60 хв

Fig. 9. Thermal distribution in beam cross-section 200x50 mm after the one-side fire exposure during:
а- 45 min; б- 60 min



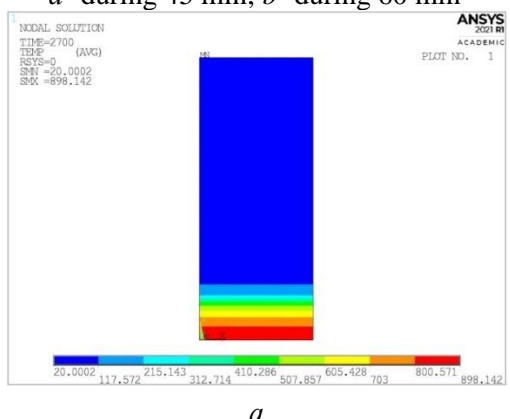
а



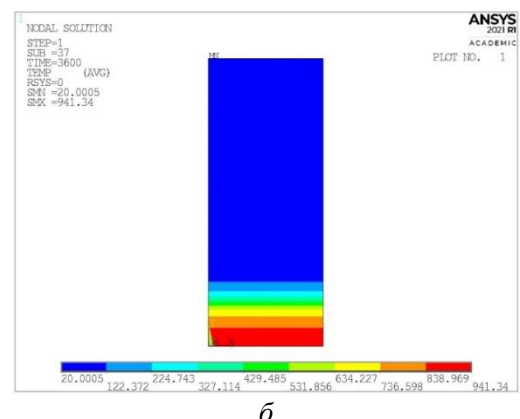
б

Рис. 10. Розподіл температури балки 200x50 мм при тристоронньому вогневому впливі тривалістю:
а- 45 хв; б- 60 хв

Fig. 10. Thermal distribution in beam cross-section 200x50 mm after the three-side fire exposure:
а- during 45 min; б- during 60 min



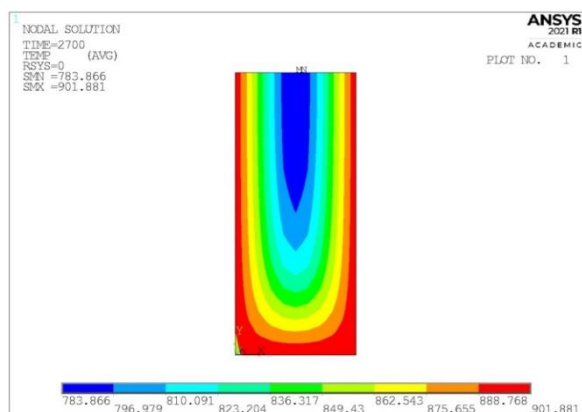
а



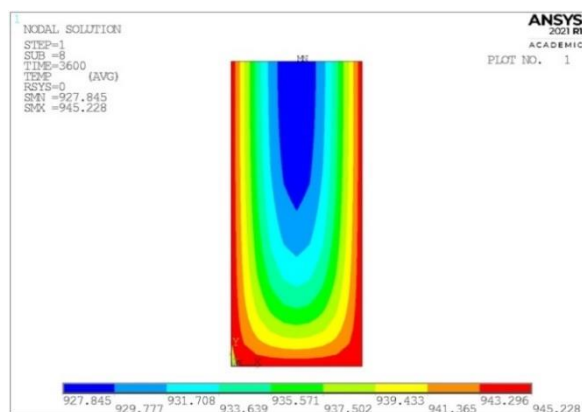
б

Рис. 11. Розподіл температури балки 250x100 мм при односторонньому вогневому впливі тривалістю:
а- 45 хв; б- 60 хв

Fig. 11. Thermal distribution in beam cross-section 250x100 mm after the one-side fire exposure during:
а- 45 min; б- 60 min



a



б

Рис. 12. Розподіл температури балки 200x50 мм при тристоронньому вогневому впливі протягом: *a*-45 хв; *б*- 60 хв

Fig. 12. Thermal distribution in beam cross-section 200x50 mm after the three-side fire exposure during: *a*- 45 min; *b*- 60 min

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. За результатами спрощеного розрахунку час початку обвуглювання елементів перекриття модуля і час руйнування панелі основи модуля менші за тривалість прямого вогневого впливу на основу модуля. Таким чином, несуча здатність перекриття будинку протягом вогневого впливу тривалістю 45 хв забезпечена.

2. За результатами теплофізичного розрахунку розподілу температури у поперечних перерізах дерев'яних балок перекриття було встановлено таке:

- при тристоронньому нагріві балок середня температура становила для 45 хв – 788-902 °С, для 60 хв – 928-945 °С, що відповідає значенню температури пожежі. Таким чином, можна зробити висновок, що межа вогнестійкості балок при тристоронньому нагріві є меншою за 45 хв і не відповідає нормативним вимогам до конструкцій перекриття;

- при односторонньому нагріві балок глибина їх прогрівання має прямо пропорційну залежність від висоти перерізу і співвідноситься із результатами спрощеного розрахунку методом приведення поперечного перерізу. Температура необігріваної грані перерізу балки не перевищує 20 °С.

3. На підставі аналізу результатів спрощеного і уточненого розрахунків, зроблено висновок, що для забезпечення нормованої

для перекриття житлових будинків межі вогнестійкості 45 (60) хв дерев'яні балки перекриття потребують улаштування вогнезахисту із трьох сторін, які можуть зазнавати вогневого впливу у разі пожежі. Товщину вогнезахисного шару дерев'яних конструкцій перекриття слід визначати на підставі розрахунків на вогнестійкість..

ЛІТЕРАТУРА

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/Пожежа_в_таборі_«Вікторія»
2. https://uk.wikipedia.org/wiki/Пожежа_в_Одесі_4_грудня_2019_року
3. [https://uk.wikipedia.org/wiki/%Пожежа_у_пансіонаті_для_літніх_людей_у_Харкові_\(2021\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%Пожежа_у_пансіонаті_для_літніх_людей_у_Харкові_(2021))
4. Закон України «Про надання будівельної продукції на ринку»
5. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. (EN 1992-1-2:2004, IDT) – Чинний від 2013-07-01 – К.: Мінрегіон України, 2013. – 135 с. – (Національний стандарт України)
6. 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) – Чинний від 2014-01-01 – К.: Мінрегіон України, 2012. – 106 с. – (Національний стандарт України)
7. ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012 Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, IDT) – Чинний від 2013-07-01 – К.: Мінрегіон

- України, 2013. – 96 с. – (Національний стандарт України)
8. **ДБН В.1.1-7:2016** Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги: – [Чинні від 2017-06-01]. – К.: Мінрегіон України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2017. – 47 с. – (Державні будівельні норми)
 9. **Пелех А. Б.** Несуча здатність та деформативність стиснутих дерев'яних елементів при локальному впливі високих температур : дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Пелех Андрій Богданович – Львів, 2021. – 176 с.
 10. **Михайловський Д.В.** Розрахунок елементів та вузлів дерев'яних конструкцій за ДБН В.2.6-161 «Дерев'яні конструкції. Основні положення»: Навчальний посібник – К.: ПНО КНУБА, 2018 – 115 с.
 11. **Шналь, Т.М.** Вогнестійкість та вогнезахист дерев'яних конструкцій: Навч. Посібник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка, 2006 – 220 с.
 12. **Поклонський В., Фесенко О., Байтала Х.** Вогнестійкість конструкцій дерев'яних каркасно-модульних багатоповерхових будинків, що зводяться в сейсмічних зонах інтенсивністю до 7-8 балів. *Наука та будівництво*, 4(6), 2015 – с. 61-65.
<https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v6i4>
 13. **Немчинов Ю.І., Поклонський В.Г., Коник Х.З., Расюк Р.В., Фесенко О.А.** Дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій. *Наука та будівництво*. К., ДП НДІБК. 2014. №2. С.11 – 16
 14. **Поклонський В.Г., Фесенко О.А., Байтала Х.З., Круковський П.В., Новак С.В.** Розрахункові методи оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за Єврокодами. Будівельні конструкції. К., ДП НДІБК. 2016. Вип. 83 (2). - С. 380-389
 15. **Колякова В.М., Божинський М.О., Фесенко О.А.** Розподіл температури в перерізі залізобетонної плити. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк: ЛНТУ. 2016. №5. С.232-239
 16. **Барашиков А.Я., Колякова В.М., Халік Н.** Теплотехнічні властивості бетону. *Зб. наук. праць. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, Рівне: НУВГП. 2008. С. 3-7
 17. **Колякова В.О., Божинський М.О.** Розрахунково-теоретичні дослідження розподілу температури в перерізі залізобетонної конструкції східчастих складок. / *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, Вип. № 1 (2017). С. 149-157.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.1.2017.149-157>
 18. **Фесенко О.А., Момотюк Д.С.** Розрахунок на вогнестійкість дерев'яних конструкцій за Єврокод 5 / Тенденції та виклики сучасної аграрної науки: теорія і практика: матеріали III міжнародної наукової інтернет-конференції (м. Київ, 20-22 жовтня 2021 р.). – К.: НУБіП України, 2021. – С. 353
 19. **Дембовська А.** Протипожежна безпека дерев'яних конструкцій згідно з нормами EN 1995-1-2 / А. Дембовська // *Промислове будівництво та інженерні споруди*, 2009. – №1. – С. 16-20.
 20. **ДСТУ Б В.1.1-4-98*** Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги: – Чинний від 1999-03-01 – К.: ДЕРЖБУД УКРАЇНИ, 2005 – 43 с. – (Національний стандарт України)
 21. **ДСТУ Б В. 1.1-20:2007** Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-2:1999, NEQ) – Чинний від 2008-04-01 – К.: Мінрегіонбуд України, 2007 – 17 с. – (Національний стандарт України)
 22. **ДБН В.2.2-15:2019** Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення. - [Чинні від 2019-12-01]. – К.: Мінрегіон України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2019. – 44 с. – (Державні будівельні норми)
 23. **ДБН В.1.2-7:2008.** Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека: – чинні з 2008-10-01. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008 – 30 с. – (Державні будівельні норми)
 24. **ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010** Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT) – Чинний від 2013-07-01 – К.: Мінрегіон України, 2011 – 81 с. – (Національний стандарт України)

REFERENCES

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/Пожежа_в_таборі_«Вікторія»
2. https://uk.wikipedia.org/wiki/Пожежа_в_Одесі_4_грудня_2019_року
3. [https://uk.wikipedia.org/wiki/%Пожежа_у_пансіонаті_для_літніх_людей_у_Харкові_\(2021\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%Пожежа_у_пансіонаті_для_літніх_людей_у_Харкові_(2021))
4. **Zakon Ukrainy** «Pro nadannia budivelnoi produktsii na rynku» (in Ukrainian)
5. **DSTU-N B EN 1992-1-2:2012.** Yevrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstrukttsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok

- konstruktsii na vohnestiikist. (EN 1992-1-2:2004, IDT) – Chynnyi vid 2014-07-01 – K.: Minrehion Ukrainy, 2013. – 135 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy) (in Ukrainian)
6. **DSTU-N B EN 1993-1-2:2010**. Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist (EN 1993-1-2:2005, IDT) – Chynnyi vid 2014-01-01 – K.: Minrehion Ukrainy, 2012. – 106 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy) (in Ukrainian)
 7. **DSTU-N B EN 1995-1-2:2012** Yevrokod 5. Proektuvannia derev`ianykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni pravyla. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist (EN 1995-1-2:2004, IDT) – Chynnyi vid 2013-07-01 – K.: Minrehion Ukrainy, 2013. – 96 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy) (in Ukrainian)
 8. **DBN V.1.1-7:2016**. Pozhezhna bezpeka obiektiv budivnytstva. Zahalni vymohy: – chynni vid 2017-06-01. – K.: Minrehion Ukrainy, 2017. – 47 s. – (Derzhavni budivelni normy) (in Ukrainian)
 9. **Pelexh A. B.** Nesucha zdatnist ta deformatyvni stysnutykh derevianykh elementiv pry lokalnomu vplyvi vysokikh temperatur : dys. kand. tekhn. nauk : 05.23.01 / Pelexh Andrii Bohdanovych – Lviv, 2021. – 176 s. (in Ukrainian)
 10. **Mykhailovskiy D.V.** Rozrakhunok elementiv ta vuzliv derevianykh konstruktsii za DBN V.2.6-161 «Dereviani konstruktsii. Osnovni polozhennia»: Navchalnyi posibnyk – K: IINO KNUBA, 2018 – 115 s. (in Ukrainian)
 11. **Shnal, T.M.** Vohnestiikist ta vohnezakhyst derevianykh konstruktsii: Navch. Posibnyk. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika, 2006 – 220 s. (in Ukrainian)
 12. **Poklonskyi V., Fesenko O., Baitala Kh.** Vohnestiikist konstruktsii derevianykh karkasno-modulnykh bahatopoverkhovykh budynkiv, shcho zvodiatsia v seismichnykh zonakh intensyvniuiu do 7-8 baliv. Nauka ta budivnytstvo, 4(6), 2015 – s. 61-65. (in Ukrainian)
 13. **Nemchynov Yu.I., Poklonskyi V.H., Konyk Kh.Z., Rasiuk R.V., Fesenko O.A.** Doslidzhenia vohnestiikosti budivelnykh konstruktsii. Nauka ta budivnytstvo. K., DP NDIBK. 2014. №2. S.11 – 16 (in Ukrainian)
 14. **Poklonskyi V.H., Fesenko O.A., Baitala Kh.Z., Krukovskiy P.H., Novak S.V.** Rozrakhunkovi metody otsinky vohnestiikosti budivelnykh konstruktsii za Yevrokodamy. Budivelni konstruktsii. K., DP NDIBK. 2016. Vyp. 83 (2). – S. 380-389 (in Ukrainian)
 15. **Koliakova V.M., Bozhynskiy M.O., Fesenko O.A.** Rozpodil temperatury v pererizi zalizobetonnoi plyty. Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. Lutsk: LNTU. 2016. №5. S.232-239 (in Ukrainian)
 16. **Barashykov A.Ia., Koliakova V.M., Khalik N.** Teplotekhnichni vlastyivosti betonu. Zb. nauk. prats. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, Rivne: NUVHP. 2008. S. 3-7 (in Ukrainian)
 17. **Koliakova V.O., Bozhynskiy M.O.** Rozrakhunkovo-teoretychni doslidzhenia rozpodilu temperatury v pererizi zalizobetonnoi konstruktsii skhidchastykh skladok. / Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka, Vyp. № 1 (2017). S. 149-157. (in Ukrainian)
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.1.2017.149-157>
 18. **Fesenko O.A., Momotiuk D.S.** Rozrakhunok na vohnestiikist derevianykh konstruktsii za Yevrokod 5 / Tendentsii ta vyklyky suchasnoi aharnoi nauky: teoriia i praktyka: materialy III mizhnarodnoi naukovoï internet-konferentsii (m. Kyiv, 20-22 zhovtnia 2021 r.). – K.: NUBiP Ukrainy, 2021. – S. 353 (in Ukrainian)
 19. **Dembovska A.** Protypozhezhna bezpeka derevianykh konstruktsii zghidno z normamy EN 1995-1-2 / A. Dembovska // Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy, 2009. – №1. – S. 16-20 (in Ukrainian)
 20. **DSTU B V.1.1-4-98*** Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstruktsii. Metody vyprobu-van na vohnestiikist. Zahalni vymohy: – Chynnyi vid 1999-03-01 – K.: DERZhBUD UKRAINY, 2005 – 43 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy) (in Ukrainian)
 21. **DSTU B V. 1.1-20:2007** Zakhyst vid pozhezhi. Perekryttia ta pokryttia. Metod vyprovuvannia na vohnestiikist (EN 1365-2:1999, NEQ) – Chynnyi vid 2008-04-01 – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2007 – 17 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy) (in Ukrainian)
 22. **DBN V.2.2-15:2019** Budynky i sporudy. Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennia. - [Chynni vid 2019-12-01]. – K.: Minrehion Ukrainy, Derzhavne pidpriemstvo «Ukrarkhbudinformat», 2019. – 44 s. – (Derzhavni budivelni normy) (in Ukrainian)
 23. **DBN V.1.2-7:2008**. Osnovni vymohy do budivel i sporud. Pozhezhna bezpeka: – chynni z 2008-10-01. – Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2008 – 30 s. – (Derzhavni budivelni normy) (in Ukrainian)
 24. **DSTU-N B EN 1991-1-2:2010** Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni dii. Dii na konstruktsii pid chas pozhezhi (EN 1991-1-2:2002, IDT) – Chynnyi vid 2013-07-01 – K.: Minrehion Ukrainy, 2011 – 81 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy) (in Ukrainian)

FIRE RESISTANCE ANALYSIS OF BENDING TIMBER STRUCTURES ACCORDING TO EUROCODE 5

*Yevhen DMYTRENKO, Vira KOLIAKOVA,
Daryna MOMOTYUK, Oleg FESENKO*

Abstract. The article contains the results of the fire resistance analysis of timber bending structures by a simplified method of reduced cross-section and an advanced method by solving the differential equation of non-stationary thermal conductivity.

The fire resistance analysis of timber floor elements was performed according to the procedure described in Eurocode 5, part 1-2.

The fire resistance analysis with respect to the load-bearing function and insulation function was performed with the reduced cross-section method.

According to the results of the analysis, the failure time of the fire protection and the time of start

of charring of the floor elements were determined by the method of the reduced cross-section method.

The time of fire resistance of the floor with respect to insulation function was defined as the sum of the values of the times of fire resistance of individual layers and structural floor elements.

The thermal analysis of the fire resistance of timber floor beams was performed by the finite element method using the Ansys Mechanical 2021 R1 Academic software.

Relationships between thermal properties of wood – specific heat, thermal conductivity, density and elevated temperature were adopted in accordance with the standard DSTU-N B EN 1995-1-2.

The results of thermal analysis of fire resistance were obtained for three types of cross-sections, for two options of heating during a fire – from one and three sides for 45 and 60 minutes.

Keywords. Fire resistance; timber structures; residual cross-section; thermal analysis.

Стаття надійшла до редакції 19.05.22