

УДК 614.841.45

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.47.1128

ВПЛИВ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

БЄЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,

ТОДОРОВ О. П.^{2*}, *асп.*,

КРЕКНІН К. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,

ХАРЧЕНКО В. В.⁴,

ЯВОРСЬКА О. О.⁵, *докт. техн. наук, проф.*

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: belicov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 523-22-55, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: krekniin.kyrylo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1812-7400

⁴ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, вул. Січеславська Набережна, 17, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: harchenko-76@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7653-3001

⁵ Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: yavorska.o.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5516-5310

Анотація. Постановка проблеми. Дерев'яні конструкції широко використовуються у будівництві як в Україні, так і в усьому світі. Вони мають багато переваг відносно інших будівельних матеріалів, що особливо ціниться при зведенні житлових та громадських будівель. Однак, деревина є горючим матеріалом і при наявності джерела високої температури здатна стійко підтримувати горіння. На сьогодні не існує практичних і перевірених методів оцінки вогнестійкості таких конструкцій. З огляду на це, виникає необхідність у подальшому теоретичному дослідженні процесів нагрівання та горіння деревини під час пожеж. Для кращого розуміння складного процесу горіння доцільно розділити його на окремі характерні стадії, що можуть суттєво впливати на оцінку вогнестійкості конструкцій. **Мета статті** полягає в аналітичному вивченні впливу високих температур на несучу здатність дерев'яних конструкцій, зокрема в умовах пожеж. Розглядаються деструктивні процеси, що відбуваються в деревині під час нагрівання, які призводять до зниження її міцності навіть без видимих ознак вигорання. Стаття також акцентує увагу на необхідності подальшого теоретичного вивчення процесів тепломасоперенесення для оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій. **Висновок.** Дерев'яні конструкції мають багато переваг, однак їх вогнестійкість залишається проблемою через схильність деревини до займання. Важливою загрозою є не тільки вигорання, але й деструктивні процеси, які можуть знижувати міцність конструкцій без видимих ознак займання. Складність процесу горіння ускладнює розробку надійних методів оцінки вогнестійкості, тому необхідні подальші дослідження. Запропоновані математичні моделі можуть допомогти краще зрозуміти процеси тепломасообміну та покращити методи оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

Ключові слова: будівельні матеріали; вогнезахисне покриття; висока температура; пожежна небезпека; горіння матеріалів; горючість матеріалів; будівельні конструкції

THE IMPACT OF HIGH TEMPERATURES ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF WOODEN STRUCTURES

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

TODOROV O.P.^{2*}, *Postgrad. Stud.*,

KREKNIN K.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

HARCHENKO V.V.³,

YAVORSKA O.O.⁵, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

¹ Department of Occupational Safety, Civil and Technogenic Security, Ukrainian State University of Science and Technologies,

ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: belicov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Occupational Safety, Civil and Technogenic Security, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 523-22-55, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Department of Occupational Safety, Civil and Technogenic Security, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: kreknnin.kyrylo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1812-7400

⁴ Dnipropetrovsk Scientific Research Expert-Criminalistic Center of the MIA of Ukraine, 17, Str. Sicheslavs'ka Naberejna, Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: harchenko-76@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7653-3001

⁵ Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: yavorska.o.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5516-5310

Abstract. Problem statement Wooden structures are widely used in construction both in Ukraine and globally. They offer numerous advantages over other building materials, which is particularly valued in the construction of residential and public buildings. However, wood is a combustible material, and in the presence of a high-temperature source, it can sustain burning. Recent scientific studies have increasingly focused on the destructive processes occurring in wood under the influence of high temperatures, particularly the burnout of surface layers of the structure to a critical level, which may lead to collapse. However, insufficient attention has been paid to other destructive changes that can reduce the integrity and load-bearing capacity of wood without visible signs of burning. The complexity and interdependence of different stages of the wood combustion process make it difficult, and sometimes impossible, to accurately assess its fire resistance and develop effective methods to improve the fire resistance of wooden structures. Currently, there are no practical and tested methods for assessing the fire resistance of such structures. Given this, there is a need for further theoretical research into the processes of heating and burning of wood during fires. To better understand the complex combustion process, it is advisable to divide it into characteristic stages, which can significantly influence the assessment of the structure's fire resistance. **Purpose of the article** to analyze the impact of high temperatures on the load-bearing capacity of wooden structures, particularly in fire conditions. The article examines destructive processes occurring in wood during heating, which lead to a reduction in its strength even without visible signs of burning. The article also emphasizes the need for further theoretical studies of heat and mass transfer processes to assess the fire resistance of wooden structures. **Conclusion.** Wooden structures have many advantages, but their fire resistance remains a challenge due to the combustibility of wood. A significant threat is posed not only by burning but also by destructive processes that can weaken the structures without visible signs of ignition. The complexity of the combustion process complicates the development of reliable fire resistance assessment methods, thus necessitating further research. The proposed mathematical models can help better understand the processes of heat and mass transfer and improve methods for assessing the fire resistance of wooden structures.

Keywords: *building materials; fire-resistant coating; high temperature; fire hazard; burning of materials; flammability of materials; building structures*

Постановка проблеми. Дерев'яні конструкції широко застосовуються в будівництві в світі та Україні. При цілій низці позитивних якостей деревини є органічність, комфортність що особливо ціниться при зведенні житла, побутових закладів. В той же час деревина є горючим матеріалом і при присутності високотемпературного джерела здатна стійко горіти. В той же час в останніх наукових роботах все більше уваги приділяється деструктивним процесам які протікають в деревині при дії високих температур з точки зору вигорання попередньої площини конструкцій до критичного значення, що призводить до обрушення конструкцій. В той же час недостатньо уваги приділяється іншим деструктивним процесам, які притікають в

деревині, що може привести до втрати її цілісності, зниження несучої здатності без видимих ознак вигорання.

Складність і взаємозв'язок різних стадій процесу горіння деревини ускладнюють, а іноді й унеможливають оцінку вогнестійкості та підвищення вогнестійкості будівельних дерев'яних конструкцій. Тому для дерев'яних конструкцій нині немає перевірених практично методів оцінки вогнестійкості.

У зв'язку з цим, для більш повного розуміння процесів, що відбуваються, виникла необхідність подальшого теоретичного вивчення прогріву і горіння деревини при вогневому впливі на пожежі. Розглянемо складний процес горіння, умовно розбиваючи його на характерні

стадії, які можуть суттєво вплинути на оцінку вогнестійкості конструкції.

Мета статті полягає в аналітичному вивченні впливу високих температур на несучу здатність дерев'яних конструкцій, зокрема в умовах пожеж. Розглядаються деструктивні процеси, що відбуваються в деревині під час нагрівання, які призводять до зниження її міцності навіть без видимих ознак вигорання. Всі ці питання потребують подальшого теоретичного вивчення процесів тепломасоперенесення для оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

Результати досліджень. У деревині, яка є капілярно-пористим тілом, суттєву роль на тепло- і масоперенос надає пористість і вміст води. Пористість деревини коливається у широкому інтервалі

$$q_i = \sum_{k=1}^m L_{ik} X_k, L_{ik} = L_{ki}; i = 1, 2, \dots, m,$$

де – q_i – потік субстанції (наприклад потік тепла); X_k – термодинамічні рушійні сили (градієнт температури тощо); L_{ik} – так звані феноменологічні коефіцієнти [8], L_{ii} – пов'язані з дією прямого ефекту для

$$x_t = -\frac{\nabla T}{T}, \quad (2.1)$$

а перенесення речовини:

$$x_u = -T\nabla\left(\frac{\mu}{T}\right), \quad (2.2)$$

де – хімічний потенціал, під яким розуміють роботу, що витрачається збільшення числа молекул у системі на

$$q_t = -L_{tt}\nabla T / T - L_{tu}T\nabla(\mu / T), \quad (2.3)$$

$$q_u = -L_{ut}\nabla T / T - L_{uu}T\nabla(\mu / T), \quad (2.4)$$

де $L_{uu} = L_{uu}$, згідно з принципом взаємності, коли вплив різних потоків один на одного рівнозначний [3;4]. З формул (2.3.), (2.4.) видно, що перенесення енергії визначається як теплової рушійної силою

$$x_t = -\frac{\nabla T}{T}, \text{ а й дією масообмінної}$$

та багато в чому залежить від виду деревини (для дуба – 58 %, для ялини до 73 %). Кількість адсорбційної та капілярно-конденсаційної води, наявність пор та мікропустот їх характер, а також присутність полімолекулярних прошарків у стінках клітин деревини визначають капілярні явища та ефузійне перенесення тепла та води при вогневому впливі на деревину [1; 2].

Для опису взаємопов'язаних процесів перенесення тепла та води в даний час широкого поширення набув метод, названий термодинамікою незворотних процесів, в основі якого лежать принципи лінійності та мікроскопічної оборотності. З цих принципів випливають феноменологічні співвідношення [3–6].

даного потоку, L_{ik} – з ефектом, що накладає.

Термодинамічною силою перенесення енергії є:

одиночку, при сталості всіх інших змінних. Звідси вирази потоків енергії q_t і речовини q_u набувають вигляду:

сили $x_u = -T\nabla\left(\frac{\mu}{T}\right)$, а перенесення

речовини визначається як прямою силою x_u , і теплообмінною силою x_t .

Після деяких перетворень [7] систему рівнянь (2.3), (2.4) можна записати у вигляді

$$q_q = -\lambda_q \nabla T - \lambda_u \delta' T \nabla \theta, \quad (2.5)$$

$$q_u = -\lambda_u \nabla \theta - \lambda_u \delta \nabla T, \quad (2.6)$$

де $\nabla \theta = \nabla \mu$ – градієнт ізотермічного хімічного потенціалу; $q_q = q_t - I_{qu}$ – потік тепла; I_{qu} – питома ентальпія системи; λ_q і λ_u – коефіцієнти тепло-і масо(волого)провідності відповідно; коефіцієнт $\delta' = \frac{1}{T} \frac{L_{uq}}{L_{uu}}$ – характеризує

потік речовини, викликаний градієнтом температури. З викладеного вище випливає, що температура є потенціалом перенесення тепла. Два тіла, що знаходяться в контактi, в стані теплової рівноваги мають однакову

температуру і різний тепломісток. Аналогічна картина має місце при перенесенні вологи

На першому етапі – прогрівання та сушіння деревини математичний опис цих процесів заснований на системі диференціальних рівнянь тепломасоперенесення [3; 4]. При переносі теплоти локальна похідна від об'ємної концентрації ентальпії за часом дорівнює дивергентності щільності потоку ентальпії, що передається за рахунок теплопровідності або дифузійного та молярного руху:

$$c\rho_0 \frac{dT}{d\tau} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \sum_i q_i - \sum_i (q'_{i\text{диф}} + q'_{i\text{мол}}) c_i \nabla T, \quad (2.7)$$

де $c = c_0 + \sum_i c_i u_i$ – наведена питома теплоємність тіла; ρ_0 – щільність тіла; λ – теплопровідність тіла; q_i – щільність внутрішніх джерел теплоти, $q'_{i\text{диф}}, q'_{i\text{мол}}$ – дифузійне та конвективне перенесення субстанції відповідно, друге доданок

праворуч – джерело тепла; третій доданок – конвективний член.

Рівняння потоку маси для колоїдного капілярного тіла, яким є деревина, з урахуванням того, що сума джерел вологи $\sum_i q'_i = 0$, має вигляд:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = \text{div}(a' \rho_0 \nabla u + a' \delta \rho_0 \nabla T), \quad (2.8)$$

де τ – час, u – концентрація вологи, a' – коефіцієнт дифузії, $a' \delta$ – коефіцієнт термодифузії, T – температура тіла.

Джерело тепла в рівнянні (2.7) зазвичай виражають через критерій фазового переходу ε [8–9], що є відношенням

кількості вологи, що переноситься. Крім того, конвективний член у процесах теплової обробки невеликий порівняно з кондуктивним, тому рівняння (2.7) спроститься:

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \rho_0 \varepsilon r_{\text{тм}} \text{div}(a' \nabla u + a' \delta \nabla T), \quad (2.9)$$

де $r_{\text{ф}}$ – теплота фазового переходу, ε – коефіцієнт стисливості.

За наявності градієнта загального тиску наведена система рівнянь доповнюється рівнянням визначення тиску P :

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{R_{\mu} T}{\Pi_0 \mu^*} \left[\nabla (K_p \nabla P) + \varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \right] + \frac{P}{T} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.10)$$

де $n_0 = \frac{\omega}{m_n}$ – пористість матеріалу;

$\varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}$ – джерело вологи; ω –

концентрація пари всередині матеріалу;

μ^* – молекулярна маса пари; R_μ –

універсальна газова постійна;

$K_p = K / \eta$ – коефіцієнт молярного

перенесення; K – коефіцієнт проникності; η

– коефіцієнт в'язкості. У наведених

рівняннях передбачається рівність

температури твердого скелета деревини та

середовища всередині її (пар, повітря,

рідина). Таке припущення може призвести

до помітних похибок при

високоінтенсивних процесах теплової

обробки. І тут можна використовувати

складніші двотемпературні постановки

завдань теплопереносу запропоновані

А. В. Ликовим та А. К. Облівіним [1; 3; 8].

Методи розрахунку процесів теплового

впливу на деревину до займання можна

звести до двох груп, усередині яких

розрахункову схему уніфіковано:

1. Процеси, у яких немає фазових перетворень чи перетворення не супроводжуються переміщенням їх межі.

$$c(t, \tau, x) \rho(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \mu(x) \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x} \nu(x) \right) + \varepsilon r_{tm} \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} + z(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \mu(x) \frac{\partial}{\partial x} \left\{ a'(u, \tau, x) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \delta(u, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x} \right) \nu(x) \right\}, \quad (2.12)$$

де c – питома теплоємність, ρ – щільність,

t – температура, λ – теплопровідність, ε –

критерій фазового переходу, r_{tm} – теплота

фазового переходу, ρ_0 – щільність сухої

деревини, вологопровідність, u – величина

вмісту вологи, $\mu(x), \nu(x)$ – коефіцієнти

форми. Рівняння (2.11.) та (2.12.) ідентичні

для зовнішньої та внутрішньої зон з різними

теплофізичними параметрами. Вони

універсальні і придатні як для плоских (при

$\mu(x) = 1$ і $\nu(x) = 1$), так і для

Початкові умови:

2. Процеси, у яких є виражений рух межі фазових перетворень (випаровування) всередині тіла.

До першої групи належать два основні випадки (чисте нагрівання): нагрівання сирової деревини за $t_0 < 0^0$ С без випаровування вологи і при сушінні після попереднього прогріву, коли практично стабільне поле температури, а при нагріванні – поле вологості.

У другій групі можна виділити два основні випадки: прогрівання деревини за $t_0 < 0^0$ С без випаровування вологи, високотемпературний процес сушіння. Характерним для аналізованих процесів є утворення двох зон по перерізу, межа між якими рухома, а поле потенціалів у зонах (температура, вологість) розвиваються за різними законами та змінюються стрибкоподібно.

Аналіз математичних формулювань всіх цих процесів показує, що для опису завдань прогріву та сушіння до моменту займання деревини можна ввести таке формулювання нестационарного крайового завдання тепломасоперенесення (для одновимірного за простором варіанта).

Диференціальні рівняння:

циліндричних виробів з дерева (при $\mu(x) = 1/r$ і $\nu(x) = 1/x$). Рівняння (2.11.)

включає в себе джерело тепла у вигляді

вологи, що підлягає фазовому переходу

всередині зон (друге доданок у правій

частині), а також конвективний член,

здатний врахувати перенесення тепла

вологою, що рухається (третій доданок у

правій частині), а рівняння – член, що

враховує термовологопровідність (другий

доданок у правій частині).

$$t(x,0)=t_0(x), \quad u(x,0)=u_0(x) \tag{2.13}$$

допускають розподіл температури і вмісту вологи у вигляді будь-яких заданих функцій.

Граничні умови (не симетричні) на поверхнях:
по теплу:

$$\alpha_1 [t_{c1}(\tau) - t|_{x=0}] - \lambda(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \tag{2.14}$$

де з боку вогнища пожежі вважаємо відомими:

$$t_{c1}(\tau) = t_0 + 3451g(8\tau + 1) > t_0 \text{ при } \tau > 0$$

сумарний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_1 = \alpha_k + \frac{C_0 \varepsilon}{t_{c1}(\tau) - t_{x=0}(\tau)} \left\{ \left[\frac{t_{c1}(\tau)}{100} \right]^4 - \left[\frac{t_{x=0}(\tau)}{100} \right]^4 \right\},$$

де – коефіцієнт тепловіддачі за рахунок конвенції; C_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла; ε – наведений коефіцієнт теплового випромінювання системи «гріюче середовище – поверхні

(Остання залежність описує температурно-часовий режим стандартного теплового впливу під час випробувань на вогнестійкість – режим «стандартної пожежі» [9]);

дерев'яного матеріалу, що обігріваються» На іншій поверхні палаючого матеріалу реалізуються умови конвективного теплообміну із середовищем, що має звичайну температуру:

$$\alpha_2 [t_{c2} - t|_{x=l}] - \lambda(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \tag{2.15}$$

за вологою задаємо щільність потоків вологи:

$$q_1(\tau) \Big|_{x=0} - \alpha_1(u_1, \tau, x) \rho_0(\tau, x) \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \tag{2.16}$$

$$q_2(\tau) \Big|_{x=l} + \alpha_2(u_1, \tau, x) \rho_0(\tau, x) \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \tag{2.17}$$

на межі фазового переходу:

$$t_1(\chi, \tau) = t_2(\chi) = t_{TM} = const; \tag{2.18}$$

$$u_1(\chi, \tau) = u_2(\chi, \tau) = u_{..} = const; \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned} & \left[\alpha_1(u_1, \tau, x) \frac{\partial u_1}{\partial x} + \alpha_1 \delta_1(u_1, \tau, x) \frac{\partial a_1}{\partial x} \right]_{x=\chi} = \\ & = \left[\alpha_2(u_2, \tau, x) \frac{\partial u_2}{\partial x} + \alpha_2(u_2, \tau, x) \delta_2(u, \tau, x) \frac{\partial a_2}{\partial x} \right]_{x=\chi} \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$r_{\phi} \left[(1 - \varepsilon_1) q_1'(\tau) - (1 - \varepsilon_2) q_2'(\tau) \right]_{x=\chi} = \\ = \lambda_1(t_1, \tau, x) \left. \frac{\partial t_1}{\partial x} \right|_{x=\chi} - \lambda_2(t_2, \tau, x) \left. \frac{\partial t_2}{\partial x} \right|_{x=\chi} . \quad (2.21)$$

З рівнянь (2.18), (2.19) випливає, що фазові переходи відбуваються при постійних значеннях потенціалів (температурі та вологовмісті). Рівняння (2.20)–(2.21) характеризують рівність потоків тепла та вологи на межі $x = \chi(\tau)$. При цьому остання умова включає потоки вологи і критерії фазового переходу в них \mathcal{E}_i . Система рівнянь (2.11) – (2.21), у зв'язку з нелінійністю, у

загальному випадку може бути вирішена лише чисельними методами, наприклад методом кінцевих різниць, з допомогою неявної інтегро-інтерполяційної схеми. З її допомогою можна промоделювати процеси, що передують займанню та горінню деревини: нагрівання та високотемпературного сушіння деревини. Теплофізичні параметри при прогріванні та сушінні визначаються за такими залежностями [5; 9]:

питома теплоємність – $c_p \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right), c_p = 3,5t + 3200 - 2,18 \cdot 10^2 \times (130 - 100u)^{2,28},$

розмірність – $U - \frac{\text{кж}}{\text{кг}};$

теплопровідність – $\lambda \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \right),$

$$\lambda = \begin{cases} 0,00222u t + 10^{0,2951 \lg 100u - 1,022} & \text{если } 0,05 \leq u \leq 1,0 \\ (0,00131u + 0,0009)t + 10^{0,2951 \lg 100u - 1,022} & \text{если } 1,0 < u \leq 1,3 \end{cases};$$

коефіцієнт вологопровідності - теплообміну в режимі сушіння – $a_{\text{вл}} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right), a_{\text{вл}} = 10^{9,361 \lg(t+273) - 22,6} \cdot 10^{-10} - \alpha_{\kappa} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \right)$

для сосни, коефіцієнт конвективного

$$\alpha_{\text{в}} = 8,35(0,00625t_c + 21) \left(\frac{v}{0,0083t_c + 1,37} \right)^{0,8} \cdot l^{-0,2};$$

коефіцієнт вологообміну – $\alpha_{\text{вл}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) :$

$$\alpha_{\text{вл0}} = \left[0,527(t_c + 10)^{2,06} \cdot 10^{-4} + 0,04 \right] \times \\ \times \left[(5v + 3,5) - (0,0017v + 0,0116) \cdot (\phi - 45)^2 \right] 10^{-7},$$

де рівноважна вологість

$$W_p(\%), W_p = 10,6^{\phi} (0,0327 - 0,00015t) \cdot 100,$$

де ϕ – частки од.; щільність: $\rho \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right) :$

$$\rho = \begin{cases} \rho = \rho_0(1+u), & \text{если } u > 0,3 \\ \rho = \rho_0 \frac{(1+u) \cdot (100 - K_p \cdot 30)}{100 + K_p \cdot 100u}, & \text{если } u \leq 0,3 \end{cases};$$

поправка на щільність щодо теплопровідності λ –

$$K_\lambda = \frac{1}{1,864 - 0,00175\rho_0}.$$

Тут ρ_0 – базова щільність деревини. Процеси нагрівання деревини при $t_0 > 0^\circ\text{C}$ без випаровування вологи добре вивчені, тому зупинимося на деяких стадіях нагрівання деревини.

До досягнення вологості деревини температури кипіння рідини відбувається звичайний прогрів і сушіння.

При досягненні вологості деревини температури рівної температурі кипіння води (при $P = 0,1$ МПа, $t_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$) випаровування вільної вологи переходить у кипіння. Починається так званий високотемпературний процес, що супроводжується стабілізацією температури деревини на рівні $t \geq t_{\text{кип}}$ і молекулярним перенесенням вологи під впливом внутрішнього надлишкового тиску, створюваного тільки парою. Така картина спостерігається у зв'язку з тим, що кипіння відбувається при температурі, при якій пружність парів рідини дорівнює тиску навколишнього простору, що призводить до витіснення повітря, а стабілізація температури пояснюється неможливістю підвищити температуру фази, що випаровується вище температури пароутворення до моменту перетворення всієї киплячої рідини в пару. Процес кипіння відбувається не по всьому перерізу одночасно, а на межі, яка внаслідок анізотропії може мати певну товщину. Після періоду википання вільної вологи по всьому перерізу встановлюється вологість $W < W_{\text{п.н.}}$ – вологості межі насичення клітинних стінок, і рух вологи тут визначається тими ж факторами, що і при низькотемпературному процесі, але протікає з більшою швидкістю.

На основі проведених аналітичних досліджень коротко розглянемо вплив стадії прогріву та висушування деревини у процесі

горіння на можливі зміни вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

При високотемпературному нагріванні в режимі стандартної пожежі, коли $t_{c1}(\tau) = t_0 + 3451g(8\tau + 1) > t_0$ при $\tau > 0$., відбувається утворення двох зон перетину конструкції. Кордон між цими зонами рухливий і визначається відповідними умовами розвитку процесу (рівняння (2.18)–(2.21)). Зони, що утворюються при висушуванні та нагріванні, характеризуються різним перебігом процесів тепломасообміну.

У деревині до процесу висушування у процесі горіння вологість визначається межею насичення стінок клітин – $W_{\text{п.н.}}$. При досягненні деревини температури кипіння води (при $P = 0,1$ МПа, $t_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$) випаровування вільної вологи переходить у кипіння. Пружність парів рідини досягає тиску навколишнього простору, що призводить до витіснення повітря та стабілізації температури $t \geq t_{\text{кип}}$. Подальше підвищення температури фази, що випаровується вище температури пароутворення неможливе до моменту перетворення всієї киплячої рідини в пар. Після періоду википання вільної вологи по всьому перерізу зони встановлюється вологість $W < W_{\text{п.н.}}$.

Таким чином, система рівнянь перенесення тепла та вологи у приватних похідних (2.11)–(2.12) з відомими початковими розподілами температури та вологості (2.13)–(2.14) при заданих граничних теплових умовах стандартної пожежі (2.14)–(2.15) та вологообміну (2.16)–(2.17) та з урахуванням зон з різними фізичними властивостями при фазових переходах, межа яких визначається умовами (2.18)–(2.21), дозволяє повністю

розрахувати поля температур та вологості до моменту займання деревини.

Аналітичні дослідження показали, що при дії температури на деревину до її займання в процесі початкової стадії пожежі може понижати межу вогнестійкості конструкцій.

Висновки

Одним із критеріїв межі вогнестійкості конструкцій є втрата або зміна несучої здатності. Сутність оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій полягає у визначенні часу горіння, після якого перетин конструкції зменшується до критичного значення. Внаслідок зменшення перерізу напруга збільшується і при досягненні межі міцності конструкція руйнується. Однак, як показали аналітичні

дослідження, бурхливе википання і пароутворення може призвести не тільки до ослаблення стінок клітин деревини, але й може призвести навіть до їх часткового руйнування. Як показали дослідження таке явище здатне змінити межу міцності до 10 % навіть не обвугленої, а тільки «підсушеної» деревини. Таку деревину на відміну від обвугленої назвемо «свіжою» деревиною. На основі проведених досліджень виникає необхідність при оцінці вогнестійкості або підвищенні вогнестійкості будівельних дерев'яних конструкцій визначати зміну міцності «свіжої» деревини в зоні де $t \geq t_{\text{крит}}$, так як ця зона матиме місце на всіх стадіях процесу горіння та просуватиметься до центру конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калафат К. В., Вахитова Л. Н. Каталог средств огнезащиты стальных конструкций. Метінвест, 2017. 91 с.
2. Пронин Д. Г. Огнестойкость стальных несущих конструкций. Аксиом графикас юнион, 2015. 52 с.
3. Вахитова Л. Н., Калафат К. В. Основы огнезащиты стальных конструкций. *Промислове виробництво та інженерні споруди*. 2015. № 2. С. 23–27.
4. ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ : Держбуд України, 2005. 19 с.
5. ДСТУ-Н-ПБВ.1.1-29:2010. Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 9 с.
6. ДСТУ-НБ 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). Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 98 с.
7. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
8. Новак С. В., Добростан О. В., Долішній Ю. В., Ратушний О. В. Оцінювання збіжності результатів експериментального визначення тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури сталі. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 2 (4). С. 67–72.
9. ТУ У 24.3-13481691-011:2009. Суміші для вогнезахисних та теплоізолюючих покриттів марки «ТЕРМОДОН» (2004). Технічні умови. Донецький центр стандартизації, метрології та сертифікації, 2009. 18 с.

REFERENCES

1. Calafat K.V. and Vakhitova L.N. *Katalog sredstv ognezashchity stal'nykh konstruksiy* [Catalog of fire protection products for steel structures]. Metinvest Publ., 2017, 91 p. (in Russian).
2. Pronin D.G. *Ognestojkost' stal'nyh nesushchih konstruksij* [Fire resistance of steel load-bearing structures]. Axiom grafiks yunion Publ., 2015, 52 p. (in Russian).
3. Vakhitova L.N. and Calafat K.V. *Osnovy ognezashchity stal'nyh konstruksij* [Fundamentals of fire protection of steel structures]. *Promislove virobnictvo ta inzhenerni sporudi* [Industrial production and engineering facilities]. 2015, no. 2, pp. 23–27. (in Russian).
4. *DSTU B V.1.1-4-98*. Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstruksii. Metody vyprobuvan na vohnestistikist. Zahalni vymohy* [Fire protection. Building constructions. Test methods for firefighters. General requirement]. Kyiv : Derzhbud Ukrainy, 2005, 19 p. (in Ukrainian).
5. *DSTU-N-P B V.1.1-29:2010. Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysne obrobliannia budivelnykh konstruksii. Zahalni vymohy ta metody kontroliuvannia* [Fire protection. Fire-retardant treatment of building structures. General requirements and control methods]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 9 p. (in Ukrainian).

6. *DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Yevrokod 3: Proektuvannia stalevykhkonstruksii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist* [Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2. Terms. Calculation of structures for fire resistance] (EN 1993-1-2: 2005, IDT). Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012, 98 p. (in Ukrainian).

7. *DSTU-N B B.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist* [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2016, 111 p. (in Ukrainian).

8. Novak S.V., Dobrostan O.V., Dolishniy Y.V. and Ratushny O.V. *Otsiniuvannia zbizhnosti rezultativ eksperymentalnoho vyznachennia tryvalosti vohnevoho vplyvu do dosiahnennia krytychnoi temperatury stali* [Evaluation of convergence of results of experimental determination of duration of fire influence before achievement of critical temperature of steel]. 2017, no. 2 (4), pp. 67–72. (in Ukrainian).

9. *TU U 24.3-13481691-011:2009.Sumishi dlia vohnezakhysnykh ta teploizoliuiuchykh pokryttiv marky "TERMODON" (2004). Tekhnichni umovy* [Mixtures for fire-retardant and heat-insulating coverings of the TERMODON brand. Specifications]. Donetsk Center for Standardization, Metrology and Certification, 18 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.12.2024.