

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВІДНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Кравченко А. В. *м.н.с., Цапко Ю. В.,* *к.т.н., с.н.с.,*
Гузій С. Г., *к.т.н., с.н.с.*

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів, Україна*

На теперішній час в будівництві широкий спектр застосування займає деревина, зокрема, несучі стіни, елементи горючих приміщень, перегородки, двері тощо, яка відноситься до горючих будівельних матеріалів і потребує захисту від дії полум'я та передачі тепла.

На сьогодні існує два способи вогнезахисту деревини. Перший – це просочення антипіренами, частіше за все на основі неорганічних солей [1]. При зволоженні деревини вогнезахисні речовини розчиняються у вологому середовищі і поступово вимиваються на поверхню, а тоді з часом вогнезахисний ефект знижується [2, 3]. Другий засіб – це нанесення на поверхню деревини покриття на органічному чи неорганічному в'язучому. Засіб на органічному в'язучому має підвищене димоутворення і виділення токсичних речовин, тому його використання небезпечне. Найбільш ефективними вважаються вогнезахисні покриття на неорганічному в'язучому, властивості яких вже досліджені [4, 5].

Метою роботи було визначення часу передавання густини теплового потоку та вплив вогнезахисту на температуропровідність деревини, що дозволить більш ефективно забезпечити пожежну безпеку будівельних виробів та конструкцій.

В даній роботі визначено вплив вогнезахисту на температуропровідність деревини та поширення теплового потоку по товщині стінки від зовнішнього теплового впливу. Розглядалась одношарова стінка, яку виготовлено з деревини сосни в тому числі обробленої засобами вогнезахисту.

Для визначення цієї залежності застосовано метод, що ґрунтується на математичному моделюванні процесів теплообміну конструкції в умовах заданого температурного режиму [6, 7].

Теплова схема дерев'яної стінки наведена на рис. 1.

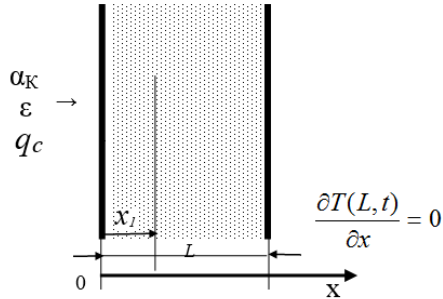


Рис. 1. Теплова схема дерев'яної стінки

Математична модель складається з рівнянь теплопровідності та умов однозначності і має такий вигляд :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$T(x,0) = T_0 \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \alpha^* (T_c(t) - T(0,t)) \quad (4)$$

$$\alpha^* = \alpha_k + \frac{C_0 \varepsilon}{T_c(t) - T(0,t)} \left\{ \left(\frac{T_c(t)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T(0,t)}{100} \right)^4 \right\} \quad (5)$$

де: T – температура стінки, К;

T_c – температура нагрівного середовища, К;

x – координата, м;

t – час, с;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт · м⁻¹ · К⁻¹;

c – питома масова теплоємність матеріалу, Дж·кг⁻¹·К⁻¹;

ρ – густина матеріалу, кг·м⁻³;

α^* – сумарний коефіцієнт тепловіддачі на обігрівній поверхні стінки, Вт·м⁻²·К⁻¹;

α_k – коефіцієнт тепловіддачі конвенцією на обігрівній поверхні стінки, Вт · м⁻² · К⁻¹;

C_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$;
 ε – зведений коефіцієнт теплового випромінювання системи “нагрівальне середовище – обігрівна поверхня стінки”.

Розв’язання задачі полягає в оцінюванні густини теплового потоку в дискретні моменти часу відповідно до рівняння:

$$q(t_i) = -\lambda \cdot \frac{\partial T(x, t_i)}{\partial x} \quad (6)$$

Рішення для температури в плоскому напівбезкінцевому тілі, яке визначається умовою $x > 0$ і піддається дії теплового потоку постійної густини, має наступний вигляд [8]:

$$T(x, t) = T_0 + 2 \frac{q_c}{\lambda} (a \cdot t)^{1/2} \cdot \text{ierfc} \left[\left(\frac{4a \cdot t}{x^2} \right)^{-1/2} \right] \quad (7)$$

де q_c – значення густини теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$\text{ierfc}(z) = \pi^{-1/2} \cdot \exp(-z^2) \cdot z \cdot \text{erfc}(z)$ – функція Лапласа;

a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу:, (для деревини – 8.2×10^{-8} , повітря – 1.9×10^{-5}), $\text{м}^2/\text{с}$.

Температура на нагрівній поверхні описується наступним рівнянням:

$$T(0, t) = T_0 + 2 \left(\frac{q_c}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{a \cdot t}{\pi} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Але це рішення справедливо для лінійних задач, коли теплофізичні характеристики матеріалу не залежать від зміни температури.

Якщо допустити, що коефіцієнт теплопровідності (λ), густина матеріалу (ρ) і питома теплоємність (c) є функціями координати, початкове розподілення температури матеріалу, товщина стінки і координата температури відомі, а значення температури в точці x_i відповідає значенню виміряній Y_i в момент часу t_i :

$$T(x_i, t_i) = Y_i \quad (9)$$

то, для вирішення задачі (1–5) можна застосувати метод Дюамеля, який полягає в визначенні температури усередині тіла і послідовному розрахунку градієнта температури:

$$T(x, t) = T_0 + \int_{t_0}^t u(x, t+k) \frac{\partial Y(k)}{\partial k} + \sum_{i=0}^{N-1} u(x, t-k_i) \cdot \Delta Y_i \quad (10)$$

де $u(x, t)$ – функція зміни температури тіла за початкової температури та одиничній зміні температури поверхні,

$Y(t)$ – зміна по часу температури поверхні,

T_0 – початкова температура тіла.

У співвідношенні (10) інтеграл враховує непереривну залежність по часу температуру поверхні, а сума враховує N дискретних ступінчатих змін температури поверхні, що проходять в момент часу $k_i = i \cdot \Delta t$.

Для вирішення залежності (10) застосовано принцип суперпозиції [9], а саме температура в деякій точці в момент часу t_M визначається вкладом окремих компонентів, кожен з яких відповідає тій чи іншій компоненті густини теплового потоку від q_i до q_M включно [11]:

$$T_M = T_0 + \sum_{n=1}^M q_n \cdot \Delta \phi_{M-n} \quad (11)$$

При цьому часові кроки подаються у наступному вигляді: $\Delta \phi_i = \phi_{i-1} - \phi_i$. Для визначення коефіцієнта теплопровідності відповідно до значень температури у середині плоскої пластини, на яку діє тепловий потік, приведемо залежність (7) до безрозмірного виду:

$$T^+(t_x^+) = 2(t_x^+)^{1/2} \operatorname{ierfc} \left[(4 \cdot t_x^+)^{-1/2} \right] \quad (12)$$

де

$$T^+ \equiv \frac{\lambda \cdot [T(x, t) - T_0]}{q_c \cdot x}; \quad t_x^+ \equiv \frac{a \cdot t}{x^2} \quad (13)$$

Залежність безрозмірної температури від координати і часу для плоскої пластини табульовано в [10].

Величина ϕ_i розраховується для напівбезкінцевої пластини за одичного ступінчатого збільшення густини теплового потоку на поверхні, а саме за наступних припущеннях: $T_0 = \text{const}$, $T(x, t) = \phi$ за рівнянням:

$$\phi_i = \frac{x}{\lambda} \cdot T_i^+ \quad (14)$$

Під час розв'язання задачі використовували результати вимірювань середньої температури зразків деревини і середньої температури на поверхні стінки (рис. 2-4) та кусково-лінійну апроксимацію залежностей теплофізичних характеристик (коефіцієнт теплопровідності) від температури. При цьому задавали такі значення параметрів: $\alpha_o = 8,7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; $\alpha_k = 25 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; $\varepsilon = 0,5$; $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 800 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 4 приведено результати визначення коефіцієнта теплопровідності деревини шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності за даними температурних вимірювань під час випробувань на поширення температури внутрішніх шарів деревини за залежністю (11, 15).

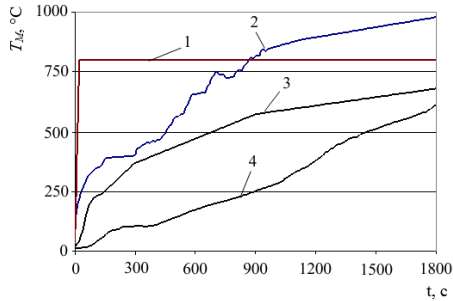
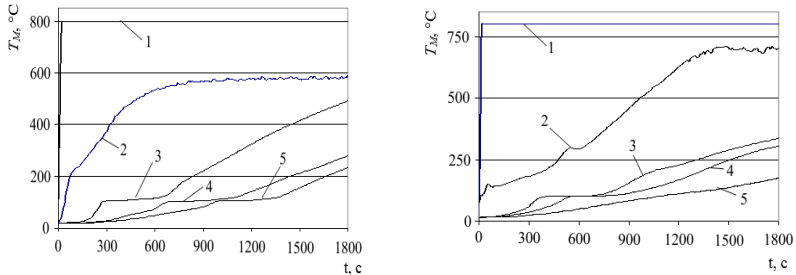


Рис. 2. Залежність температури на поверхні необробленого зразка деревини від тривалості вогневого впливу під час випробування на вогнестійкість: 1 – нагрівна температурна крива; 2 – на поверхні деревини; 3 – на глибині 50 % деревини ($L=10$ мм); 4 – на не обігрітій поверхні деревини ($L=20,0$ мм).



а

б

Рис. 3. Залежність температури на поверхні зразка деревини просоченої сумішшю фосфатів і сульфатів амонію (а) та вогнезахисного геоцементним покриттям (б) від тривалості вогневого впливу під час випробування на вогнестійкість: 1 – нагрівна температурна крива; 2 – на поверхні деревини; 3 – на глибині 25 % деревини ($L=6,6$ мм); 4 – на глибині 50 % деревини ($L=13,4$ мм); 5 – на не обігрітій поверхні деревини ($L=20,0$ мм)

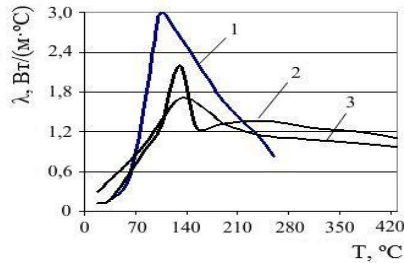


Рис. 4. Залежність коефіцієнта теплопровідності деревини від температури: 1 – необроблена; 2 – вогнезахиснена сумішшю ДСА-2; 3 – вогнезахисненої покриттям

Визначення густини теплового потоку дерев'яної стінки для заданих значень температурного впливу полягало в пошуку таких значень часу, для яких тепловий потік на не обігрівній поверхні стінки складає близько 6070 Вт/м^2 , що відповідає значенню займання деревини. При цьому під час розв'язання задачі теплопровідності задавали такі ж значення параметрів моделі, по товщині $L = 0,020 \text{ м}$.

Для оцінювання теплового потоку, як функції дискретних нестационарних температур від датчика температури, використаємо метод точної підгонки Штольца [10], а саме температура в точці вимірювання температури в момент часу T_M може бути записана у вигляді:

$$T_M = \hat{T}_M \Big|_{q_M=0} + \Delta\phi_0 \cdot q_M \quad (15)$$

де $\Delta\phi_0$ – зміна температури в точці розміщення датчика в момент часу t_1 для одиночної зміни в момент $t = 0$ густини теплового потоку:

$$\Delta\phi_0 = \frac{\partial T_M}{\partial q_M} \quad (16)$$

При точному значенню підгонки T_M прирівнюється виміряній в момент t_M температурі Y_M , а рівняння (15) вирішується відносно оціненої складової густини теплового потоку \hat{q}_M :

$$\hat{q}_M = \frac{Y_M - \hat{T}_M \Big|_{q_M=0}}{\phi_1} \quad (17)$$

де $\Delta\phi_0 = \phi_1 - \phi_0 = \phi_1$.

З урахуванням, що

$$\hat{T}_M \Big|_{q_M=0} = \sum_{i=1}^{M-1} \hat{q}_i \cdot \Delta\phi_{M-1} + T_0 \quad (18)$$

співвідношення (17) набуває наступного вигляду:

$$\hat{q}_M = \frac{Y_M - \sum_{i=1}^{M-1} \hat{q}_i \cdot \Delta\phi_{M-1} - T_0}{\phi_1} \quad (19)$$

де $\Delta\Phi = \Phi_M - \Phi_{M-1}$

Значення Φ_M розраховується за умови одиничного ступінчатого збільшення послідуного значення густини теплового потоку, яка залежить від значення Y_M , з кроком: $t_x^+ \equiv \frac{a \cdot \Delta t}{x^2}$, за рівнянням:

$$\phi_M = T^+(t_i) \cdot \frac{x}{\lambda} \quad (20)$$

На рис. 8 наведено розраховані залежності густини теплового потоку по товщині ($L = 0,020 \text{ м}$) від часу температурного впливу на деревини-

ну. Пунктирною лінією показано критичну густину теплового потоку, за якої починається займання деревини на оберненій поверхні.

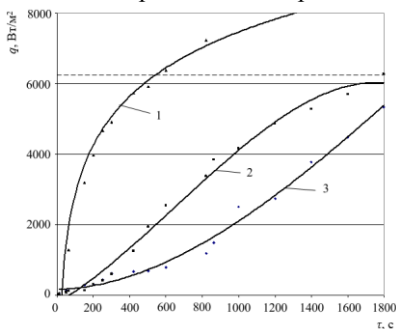


Рис. 8. Результати розрахунку густини теплового потоку залежно від часу термічного впливу на деревину: 1 – необроблена; 2 – просочена сумішшю ДСА-2; 2 – вогнезахиснена гецементним покриттям.

Як видно з рисунку 8 на поширення густини теплового потоку по товщині дерев'яної стінки суттєво впливає вогнезахисна обробка, а саме дозволяє збільшити час передавання теплового потоку.

Висновок

На основі приведених розрахунково-експериментальних методів визначено величини теплового потоку через дерев'яну стінку невогнезахисненої, так і вогнезахисненої. Після дослідження процесів теплопровідності вогнезахисненої дерев'яної стінки встановлено, що вогнезахист призводить до зменшення в 2,5÷2,7 рази коефіцієнта теплопровідності та дозволяє збільшити більш ніж в двічі час передачі теплового потоку.

Summary

A study of the thermal conductivity of timber that has been treated by means of impregnation and coating, and found a decrease in the thermal conductivity of fire protected samples. The results of changes in the transmitted heat flux density over time through the wooden wall of fire protected samples.

Література

1. Тичино Н. А. Особенности практического применения огне- и биозащитных средств для пропитки древесины / Н. А. Тичино // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Вып. 6. – М.: ВНИИПО, 2002. – С. 38–43. – 3000 пр. ISSN 0869-7493.
2. Цапко Ю. В. Дослідження процесів масопереносу антипірену у вогнебіо захищеній деревині / Ю. В. Цапко, В. М. Жартовський // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2009. – №1 (19). – С. 118–126.
3. Цапко Ю. В. Розрахунок швидкості висолювання антипірену у вогнезахищеному шарі деревини / Ю. В. Цапко // Науковий вісник УкрНДІПБ. – К.: УкрНДІПБ. – 2006. – №1 (13). – С. 83-89.
4. Гузий С. Г. Способность к вспучиванию огнезащитных геоцементных покрытий после искусственного старения [Текст] / С. Г. Гузий // “СтройПрофиль”. – 2010. – № 2(80), Часть I. – С. 108–110.
5. Krivenko P. Protection of Timber from Combustion and Burning Using Alkaline Aluminosilicate-Based Coatings [Text] / P. Krivenko, S. Guzii, A. Kravchenko // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 68, № 8. – P. 3–9
6. Круковский П. Г. Обратные задачи теплопереноса. Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1998. – 224 с.
7. Яковлев А. И., Шейкина Л.В., Савкин Н.П. Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости стальных конструкций. – Москва. 1972. – 172 с.
8. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа.- 1967.- 500 с.
9. Г. Корн Т. Корн. Справочник по математике. М.: Наука.- 1974.- 832 с., ил.
10. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клер Ч., мл. Некоректные обратные задачи теплопроводности: пер. с англ.- М.: Мир.- 1989.- 312 с., ил.