УДК 614.841.33

Р.Я. Лозинський, канд. техн. наук, доцент, Р.Б. Веселівський, В.Р. Бричка (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Дерев'яні стінові огороджувальні конструкції досить широко застосовуються в будівництві, але їх поведінка в умовах впливу високих температур є маловивченою, тому наукове обґрунтування умов застосування дерев'яних конструкцій в житлових і громадських будівлях, з урахуванням їх вогнестійкості, є актуальною науково-технічною задачею. В роботі проведено аналіз властивостей різних порід деревини і їх вплив на поведінку при горінні, та встановлено фактори котрі впливають на вогнестійкість дерев'яних конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість, обвуглювання, конструкція, деревина.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку будівництва при зведенні огороджувальних стінових конструкцій досить широко застосовуються дерев'яні конструкції, але їх поведінка в умовах впливу високих температур пожежі є маловивченою, у зв'язку з цим наукове обґрунтування умов застосування дерев'яних конструкцій в житлових і громадських будівлях з урахуванням їх вогнестійкості є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить забезпечити сучасні вимоги пожежної безпеки та енергозбереження під час проектування і експлуатації житлових і громадських будівель з їх застосуванням.

Основними компонентами деревини є целюлоза, лігнін, геміцелюлоза та неорганічні речовини (зола). Вміст целюлози становить приблизно 50 % від маси. Деревина м'яких порід містить лігніну від 23 – до 33 % в цей же час в деревині твердих порід знаходиться від 16 до 25 % лігніну. Структура деревини показана на рис. 1. Більший вміст лігніну збільшує кількість деревного вугілля. В деревині в незначних кількостях присутні азот та сірка (0,1-0,2 %), елементарний склад сухої деревини такий: 50% вуглецю, 6% водню, 44% кисню [1].

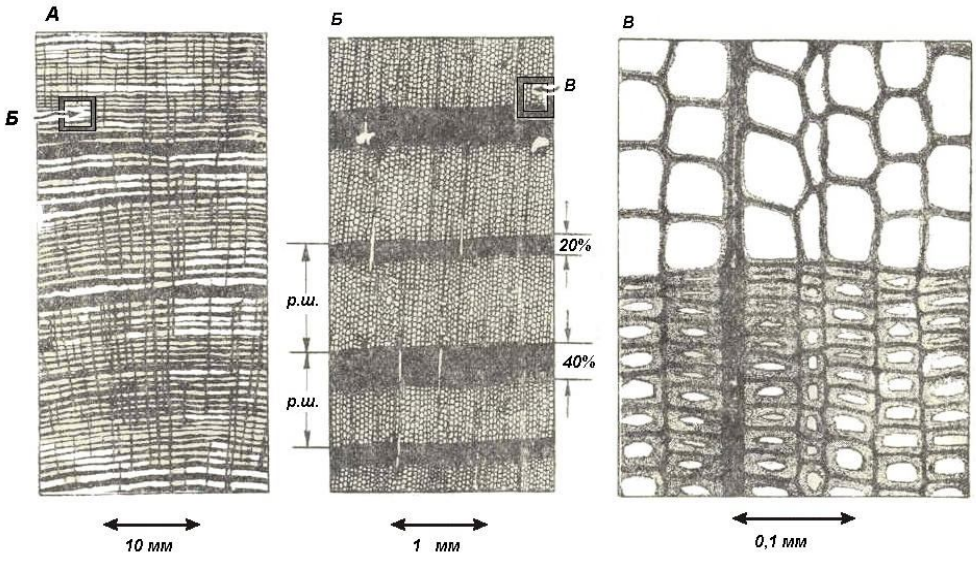

Рис.1. *Макроструктура та мікроструктура поперечного зрізу деревини сосни*

Щільність сухої деревини знаходиться в межах від 160 кг/м^3 до 1040 кг/м^3, але переважна більшість порід має щільність від 320 кг/м^3 до 720 кг/м^3. Загалом деревина із більшою щільністю обвуглюється повільніше.

Вміст вологості в деревині не є постійним. Вологість свіжозрубаної деревини може перевищувати 100 %, деревина висушена на повітрі має рівноважну вологість менше 30 %, при 23 °С та відносній вологості повітря 50 %, вміст рівноважної вологості становить 12 %. Вологість знижує міцність та швидкість обвуглювання деревини.

Більшість властивостей деревини є функцією щільності, вмісту вологості, орієнтації граней та температури.

Аналіз публікацій. В країнах ЄС, США, Канаді, Австралії дерев'яні конструкції широко використовуються в цивільному та промисловому будівництві і успішно конкурують із іншими конструктивними матеріалами. В цих країнах протягом десятиліть проводяться наукові дослідження у цьому напрямі і створена система нормативних документів яка дозволяє проектувати дерев'яні конструкції з урахуванням впливу пожежних навантажень що дозволяє забезпечити їх необхідну пожежну безпеку.

Горіння деревини – це складний фізико-хімічний процес який включає в себе піроліз, займання, та утворення деревного вугілля. Основними факторами, які впливають на поведінку деревини в умовах зростання температури, є параметри розвитку пожежі в приміщенні, обмеженому конструктивними елементами; характер експозиції дерев'яних елементів (орієнтація елемента, геометричні характеристики); наявність обшивки, яка захищає дерев'яні елементи, наявність необхідної кількості кисню для процесу горіння. Схематичне представлення процесу горіння поверхні показано на рис. 2.

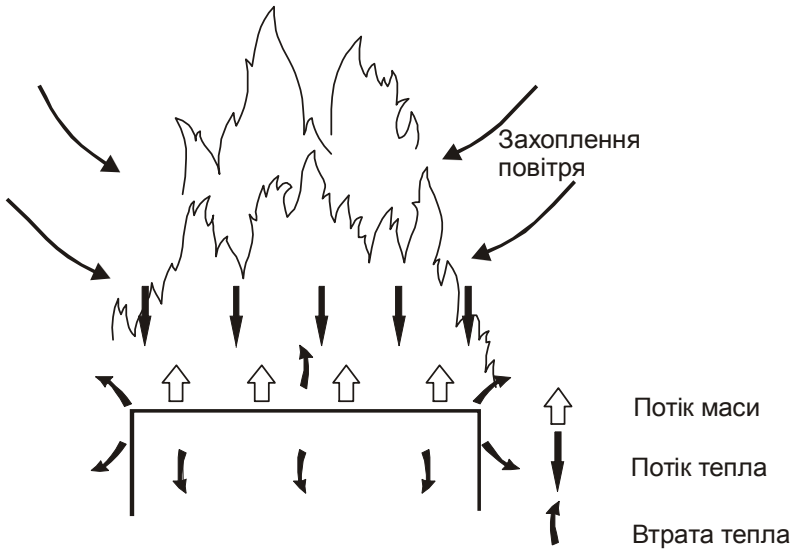

Рис. 2. *Схематичне представлення процесу горіння поверхні*

Основні чинники які визначають поведінку під час горіння та впливають на швидкість обвуглювання деревини:

- вплив рівня нагрівання випромінюванням, швидкість протікання піролізу залежить від рівня накладеного (поглинутого) на поверхню експонованої деревини випромінювання;
- утворення деревного вугілля, швидкість обвуглювання більша на початку, потім стабілізується, після утворення кількох міліметрів (6 мм) вугілля;
- вміст вологості, наявна вологість затримує утворення деревного вугілля до температури обвуглювання 300 °С поки вологість не видалиться;
- порода деревини, властивості деревини (щільність, склад, проникність) значно змінюються і різні породи деревини показують різну поведінку при горінні;

– розмір зразка, швидкість обвуглювання звичайно має два максимуми – перший при початку утворення деревного вугілля, другий при наближенні поверхні розподілу до неекспонованої поверхні. Тонкі зразки мають тенденцію до швидшого обвуглювання. Форма дерев'яного елемента впливає на швидкість з якою тепло адсорбується поверхнею і як наслідок на залишковий переріз незгорілої деревини.

Виклад матеріалів дослідження. Чисельні дослідження показують що щільність має значний вплив на швидкість горіння. Перші роботи Vorreiter показують що швидкість втрати маси пропорційна щільності. Hawley вважає що нижча щільність дає можливість більш швидкому проникненню тепла. Швидкість обвуглювання за Schaffer та Hall [2] є обернено пропорційно до щільності. Отже не зважаючи на те, що швидкість втрати маси зростає з щільністю, швидкість утворення деревного вугілля є нижчою.

Виявлено що нижча щільність зразків приводить до появи широких тріщин, в місцях розташування тріщин в деревному вугіллі і глибина обвуглювання є дещо вищою.

Коли при проектуванні дерев'яних конструкцій використовують методи де враховується зниження маси, в багатоквартирних дерев'яних рамних конструкціях MRTFC [3] рекомендується використовувати деревину густиною не менше ніж 450 кг/м^3.

Аналіз вимірювання температури в дерев'яних дошках виявив, що глибина обвуглювання не залежить від товщини дошки (більшою за деяке значення), і зразки при товщині більше 6,4 мм незначно впливають на швидкість обвуглювання.

Внаслідок низької температуропровідності деревини в результаті вогневого впливу, в перерізі елемента виникає значний температурний градієнт. Цей температурний градієнт спричиняє видалення вологи з елемента. Зміна температури та вологості визначених Вайт (White) та Шаффер (Schaffer) на зразках сосни експонованих з однієї сторони в печі при температурі 538°C протягом 20 хв показана на рис. 3. Густина зразків становила 520 кг/м^3 при початковій вологості 10 %. Згідно з Шаффером (Schaffer), температурний градієнт із зміною вологості нелегко змоделювати в методі кінцевих елементів. Хоча втрату вологості при прихованій теплоті пароутворення можна визначити успішно застосувавши просту одновимірну модель.

Встановлено, що підвищений вміст вологості збільшує затримку зростання температури внаслідок витрати енергії на перетворення вологи в пару (рис 4) і внаслідок чого знижується швидкість обвуглювання.

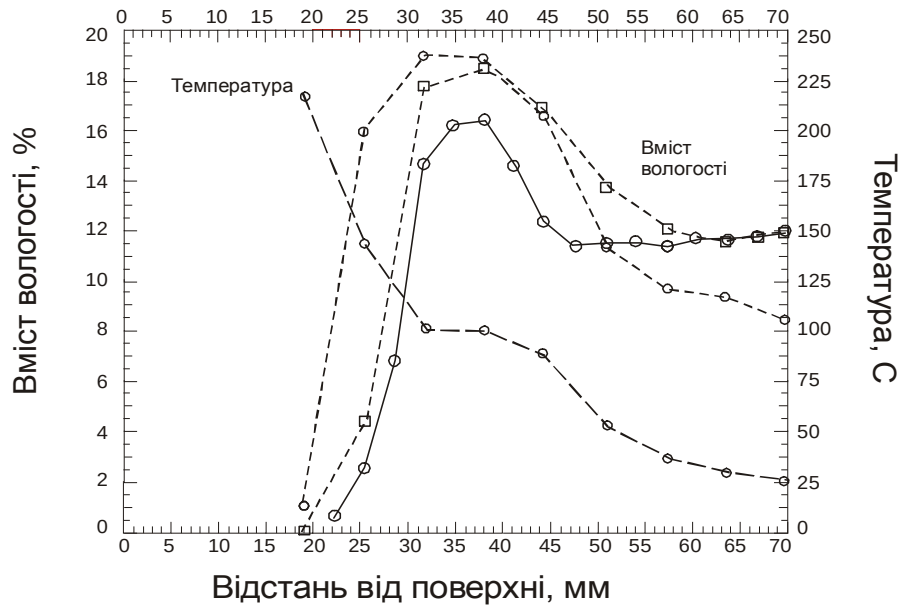

Рис.3 *Розподіл вологості та температури в перерізі дерев'яного елемента при вогневому впливі*

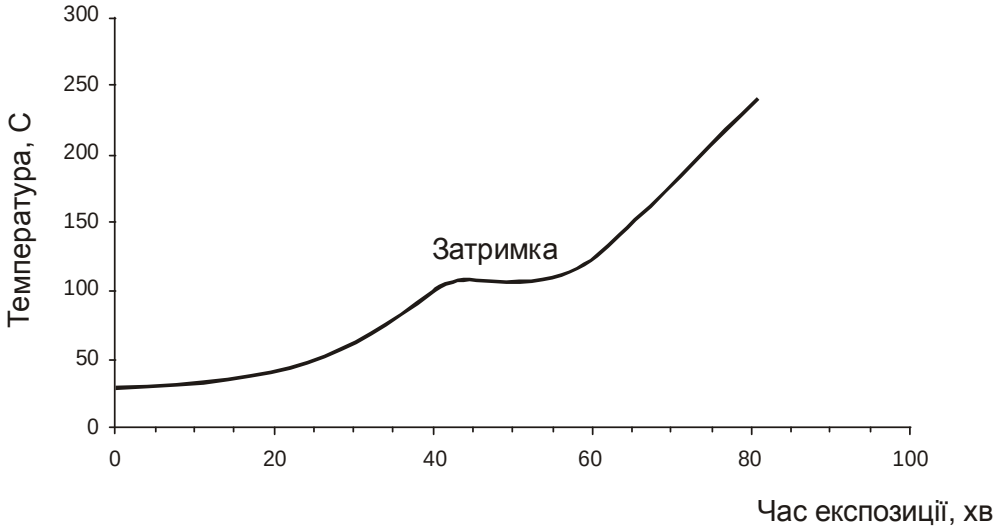

Рис. 4. *Температура у термопарі, яка розміщена в горючій деревині*

Швидкість обвуглювання це комплексний процес який залежить від характеру взаємодії між піролізом деревини та генерацією тепла, він є функцією багатьох факторів, таких як, порода деревини, щільність, вміст вологості, проникність та теплофізичні характеристики [2].

Границя розподілу між обвугленою та необвугленою деревиною має відносно різкий температурний градієнт. Положення та розташування фронту обвуглювання звичайно оцінюється температурою границі поділу 300°С. Температуру основи деревного вугілля можна прийняти 288°С.

Процес обвуглювання в дерев'яних конструкціях був об'єктом інтенсивних досліджень протягом багатьох років. В перших дослідженнях обвуглювання деревини описувалось втратою маси (г/сек) або швидкістю просування фронту обвуглювання від початкової поверхні (мм/сек). Останнє визначення більш широко застосовується у зв'язку з придатністю для визначення робочого залишкового перерізу який використовують при розрахунку дерев'яних конструкцій на вогнестійкість.

В попередніх експериментальних роботах розроблено емпіричну модель яка описує процес обвуглювання і має такий вигляд: [8]

$$\frac{\partial x}{\partial t} \approx at^n, \qquad (1)$$

де $\frac{\partial x}{\partial t}$ миттєва швидкість обвуглювання, м/с;

t – час, с;

a та n – сталі регресії.

Швидкість обвуглювання не є постійною протягом вогневого впливу. Вона має два максимуми – на початку, коли вугілля ще не сформувалося, і пізніше, коли температура в центрі елемента починає зростати.

Швидкість обвуглювання, яку використовують для проектування масивних дерев'яних конструкцій базується на експериментальних даних, що ґрунтується на стандартному вогневому впливі який регламентований ISO 834, DIN 41025, ASTM E 119, CAN/ULC S 1012 JIS 13014. Рекомендовані швидкості обвуглювання [5] наведено в табл. 1

Таблиця 1

Рекомендовані швидкості обвуглювання для проектування дерев'яних конструкцій

Вид деревини	Швидкість обвуглювання, мм/хв	Джерело
Легка, суха деревина	0,8	Lie [26]
Деревина хвойних порід середньої щільності	0,6	Lie [26]
Деревина хвойних порід	0,61-0,84	Schaffer [23]
Деревина листяних порід	<0,53	Schaffer [23]
Масивна, волога деревина	0,4	Lie [26]
Клеєдерев'яні балки та колони	0,6	App D-2.1 WFRA
Деревина загалом	0,6-1,0	Шведські будівельні норми SBN 1976

Дослідження швидкості обвуглювання, з метою розробки моделей придатних для прогнозування обвуглювання, проводились при таких температурних режимах:

- стандартної пожежі;
- нестандартної пожежі (зміна теплової експозиції);
- постійної температури.

Коніг та Валей [6] розробили розрахункову модель експозиції при стандартній пожежі для дерев'яних рамних стін та конструкцій підлог з обшивкою (гіпсокартонні листи та порожнини заповнені ізоляцією з мінеральних або скляних волокон). Опис моделі полягає в двох фазах обвуглювання: фаза захисту та фаза після захисту.

Фаза захисту – це період часу протягом якого захисна обшивка прикріплена до дерев'яної рами. Ця фаза складається з фази до обвуглювання протягом якої дерев'яна рама не обвуглюється (до часу t_{pr}) та фази обвуглювання 2, коли деревина обвуглюється і затримується обшивкою. Фаза захисту закінчується коли час t_{bf} коли обшивка руйнується та наступає фаза обвуглювання 3, протягом якої деревина безпосередньо піддається вогневому впливу.

Співвідношення обвуглювання за Коніг та Валей базуються на одномірній швидкості обвуглювання за формулою:

$$d_{char} = \beta_0 \cdot t\,, \tag{2}$$

де d_{char} – глибина обвуглювання, мм;

β_0 – швидкість обвуглювання для одновимірного обвуглювання початково незахищеної деревини експонованої за стандартною пожежею (0,67 мм/хв для хвойних порід дерева),

t – час вогневої експозиції, хв.

Відповідно глибина обвуглювання для фази 2 визначається:

$$d_{char,2} = k_s k_2 \beta_0 \left(t - t_{pr}\right), \tag{3}$$

де t_{pr} – час захисту проти обвуглювання, хв.

Подібно, глибина обвуглювання для фази після захисту, зростає із швидкістю обвуглювання:

$$\begin{aligned} d_{char,3} &= k_s k_2 \beta_0 \left(t_{bf} - t_{pr}\right) + k_s k_3 \beta_0 \left(t - t_{bf}\right) = \\ &= k_s \beta_0 \left[k_2 \left(t_{bf} - t_{pr}\right) + k_3 \left(t - t_{bf}\right)\right] \end{aligned}, \tag{4}$$

k_3 – коефіцієнт після захисту від зростання експозиції;

t_{bf} – час руйнування обшивки.

Для визначення коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності покритої деревини необхідно розв'язати рівняння теплопровідності Фур'є, яке базується на залежності температури, часу і координатою у вигляді:

$$\frac{dT}{(T)\ dt} = div\left(\lambda_{(T)} grad_{(T)}\right), \tag{5}$$

де C_v – об'ємна теплоємність (Дж/м^{3}К);

$\lambda_{(T)}$ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/м·К).

Оскільки процес нагрівання деревини є нестаціонарним, то для рішення рівняння Фур'є використовують умови III роду

$$-\lambda_{(T)} \frac{dT}{dx}\Big| w = Q_{(T)} (T_{кп} - T) \tag{6}$$

де d – коефіцієнт теплообміну (Вт/м^2·К);

$T_{кп}$ – температура камери печі, ?С.

Оскільки досліджуване покриття спучується, величина збільшення початкової товщини при нагріванні є невідомою, то коефіцієнти теплопровідності і питомої об'ємної теплопровідності належать до вихідної товщини. Для вирішення поставленої задачі використано спеціальний ітераційний метод [9], який дозволяє враховувати результати всіх випробувань, що значно підвищує його точність.

Збільшення температури нагрівання приводить до значного зростання коефіцієнта теплопровідності в інтервалі температур 70...100 ?С завдяки інтенсивному випаровуванню вологи. Для незахищеної деревини зменшення коефіцієнта теплопровідності після нагрівання вище від 110…120 ?С проходить внаслідок термічного розкладу целюлози.

Для вогнезахищеної деревини показник коефіцієнта теплопровідності збільшується незначно. Оскільки поверхня покрита ізоляційним шаром, нагрівання до температури вище від 140 ?С характеризується поступовим зменшенням коефіцієнта теплопровідності завдяки розкладу борної кислоти та карборансилоксану (вище від 300 ?С), що приводить до утворення на поверхні деревини негорючої та суцільної плівки із боросилікатного скла.

Питома теплоємність для незахищеної деревини має майже прямолінійний характер при нагріванні до температури 500 ?С. Для вогнезахищеної деревини спостерігається її зростання майже у 2 рази при нагріванні до 300 ?С і круте піднімання до 500 ?С, що пояснюється утворенням у складі покриття силікатних фаз.

Висновки. Враховуючи вищенаведене можна відзначити таке:

1. Основні фактори які визначають поведінку при горінні та впливають на швидкість обвуглювання включають:

- вплив рівня нагрівання випромінюванням – швидкість протікання піролізу залежить від рівня накладеного (поглинутого) випромінювання на поверхню експонованої деревини;
- утворення деревного вугілля – швидкість обвуглювання більша на початку, а після утворення кількох міліметрів (6 мм) вугілля, стабілізується;
- вміст вологості – наявна вологість затримує утворення деревного вугілля до температури обвуглювання 300 °С поки вологість не видалиться;
- порода деревини – властивості деревини (щільність, склад, проникність) значно змінюються і різні породи деревини показують різну поведінку при горінні;
- розмір зразка – швидкість обвуглювання звичайно має два максимуми: перший – при початку утворення деревного вугілля, другий – при наближенні поверхні розподілу до неекспонованої поверхні. Тонкі зразки мають тенденцію до вищих рівнів швидкості обвуглювання.

– форма дерев'яного елемента впливає на швидкість з якою тепло адсорбується поверхнею і, як наслідок, залишковий переріз незгорілої деревини.

2. Обвуглювання деревини яка експонована при постійному зовнішньому тепловому потоці може розглядатися як лінійна функція від часу.

3. Із збільшенням рівня теплового потоку поведінка стає нелінійною через збільшення часу необхідного для отримання глибини обвуглювання.

Список літератури:

1. Durbak et al, In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th ed, vol. 25. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.: 627-664, 1998.

2. Hall, G.S., Saunders, R.G., Allcorn, R.T., Jackman, P.E., Hickley, M.W. and Fitt, R., "Fire Performance of Timber – A Literature Survey", Timber Research and Development Association, High Wycombe, England, 1972.

3. Multi-Residential Timber Framed Construction, "Fire Protection for Timber Framing at Door and Window Penetrations", Information Bulletin No. 4, 2000.

4. White, Robert H., "Effect Of Lignin Content And Extractives On The Higher Heating Value Of Wood", Wood Fiber Sci. 19(4):446-452. 1987.

5. Lau, P. W. C; Zeeland, I. V.; and White, R., "Modelling the char behaviour of structural timber", p. 123-135. In: Proceedings of the Fire and Materials '98 Conference. 23-24 February, 1998.

6. Konig, J. and Walleij, L, "Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires, Part 2: A design model for standard fire exposure", Tratek, Rapport I 0001001, Stockholm, June 2000.

7. Konig, J., Noren, J., Bolonius Oleson F. and Toft Hansen, F., "Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires – Part 1: Fire tests", Swedish Institute for Wood Technology Research, Report No. I 9702015, 1997.

8. Новак С.В. Математическое моделирование процессов теплообмена в огнестойких конструкциях. Автореферат канд. Дис. – Харьков: Институт проблем машиностроения НАН Украины, 1996. – 24с.

9. Круковський П.Г. / Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) – К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 224 с.

Р.Я. Лозинский, канд. техн. наук, доцент, Р.Б. Веселивский, В.Р. Брычка
(Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Деревянные стеновые ограждающие конструкции достаточно широко применяются в строительстве, но их поведение в условиях воздействия высоких температур является малоизученным, поэтому научное обоснование условий применения деревянных конструкций в жилых и общественных зданиях, с учетом их огнестойкости, является актуальной научно-технической задачей. В работе проведен анализ свойств различных пород древесины и их влияние на поведение при горении, и установлены факторы влияющие на огнестойкость деревянных конструкций.

Ключевые слова: огнестойкость, обугливание, конструкция, древесина.