

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ВОДОПОГЛИНАННЯ
ТЕРМІЧНОМОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ****FEATURES OF THE WATER ABSORPTION PROCESS OF
THERMALLY MODIFIED WOOD**

Цапко Ю.В., д.т.н., проф., ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783>,
Бондаренко О.П., к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8164-6473>,
Цапко О.Ю., к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068x>,
Каверин К.О., к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9086-5953> (Київський національний університет будівництва і архітектури)

Tsapko Yu.V., Doctor of Technical Sciences, professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783>,
Bondarenko O.P., PhD., associate professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8164-6473>,
Tsapko O.Yu., PhD, associate professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068X>,
Kaverin K.O., Ph.D., associate professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9086-5953>
(Kyiv National University of Construction and Architecture)

Проведено аналіз щодо процесу термічного модифікування деревини, яка була отримана шляхом контрольованого процесу піролізу нагрівання деревини ($> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$), що викликає деякі хімічні зміни в структурах компонентів клітинної стінки (лігнін, целюлоза та геміцелюлоза), з метою підвищення її довговічності. Доведено, що у процесі термічного модифікування відбувається розпад геміцелюлоз і аморфної частини целюлози, зниження водопоглинання, а також зменшується кількість речовин, які є середовищем для розвитку грибків. Крім того, лігнін і утворений псевдолігнін проходить процес полімеризації і перерозподілу по об'єму клітини та надають стінкам клітин більшої густини, твердості, підвищують гідрофобність (відштовхування води), тим самим зменшують її здатність вбирати вологу і набрякати. Полімеризований лігнін заповнює внутрішню порожнину клітини – формується закрыта пориста структура з низькою здатністю зв'язувати воду. Встановлено, що найбільш результативним параметром зниження таких речовин є температура та час витримки. Наведено результати водопоглинання, визначено залежність на основі яких розраховано коефіцієнт дифузії при водопоглинанні. При термічному модифікуванні деревини протягом 6 годин водопоглинання знижується у понад 10 разів, що дозволяє використовувати її на об'єктах з підвищеною вологою.

The paper analyzes the process of thermal modification of wood obtained by a controlled pyrolysis process of heating wood ($> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$), which causes some chemical changes in the structures of cell wall components (lignin, cellulose, and hemicellulose) in order to increase its durability. It has been proven that the thermal modification process causes the breakdown of hemicelluloses and the amorphous part of cellulose, reduces water absorption, and reduces the amount of substances that are a breeding ground for fungi. In addition, lignin and the resulting pseudolignin undergo polymerization and redistribution throughout the cell volume, giving the cell walls greater density, hardness, and increased hydrophobicity (water repulsion), thereby reducing their ability to absorb moisture and swell. The polymerized lignin fills the internal cavity of the cell, forming a closed porous structure with a low ability to bind water. It has been established that the most effective parameter for reducing such substances is temperature and exposure time. The results of water absorption are presented, and a dependence is determined on the basis of which the diffusion coefficient for water absorption is calculated. During the thermal modification of wood for 6 hours, water absorption decreases by more than 10 times, which makes it possible to use it in objects with high humidity.

Ключові слова: деревина, ефективність модифікації, водопоглинання, дифузія води, розклад, стійкість деревини.

wood, modification efficiency, water absorption, water diffusion, decomposition, wood stability.

Вступ. На сьогоднішній день підвищити рівень експлуатації об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з деревини, можливо за допомогою її модифікування, суть якого полягає в наданні деревині здатності протистояти дії вологи, поширенню біопшкодження, які сприяють деструкції деревини і прискоренню процесу руйнування. Враховуючи вищенаведене, при модифікуванні деревини виникають труднощі щодо технологічних режимів її оброблення, таких, як час, температура. Що пов'язане у першу чергу з тим, що процес модифікування може не досягатися, а застосування термічномодифікованої деревини призводить до її руйнування [1].

Знання фізико-хімічних властивостей термічномодифікованої деревини, показників її якості, механізму дії на матеріали температури, дає змогу здійснювати її вибір з урахуванням економічних показників, тривалості і безпеки застосування, екологічних аспектів тощо [2, 3]. А застосування захисту дозволяє зберігати свої функції при експлуатації протягом заданого періоду часу [4, 5].

Тому розроблення технологічних режимів з модифікування деревини, дослідження водопоглинання, особливостей структури деревини є

невирішеною складовою забезпечення стійкості будівельних конструкцій з деревини та визначає необхідність встановлення її стійкості до руйнування.

Огляд останніх досліджень та публікацій. За останні роки у напрямку досліджень з термічного модифікування деревини відомі роботи, які направлені на вивчення рівноважної вологи при модифікуванні, стабільність розмірів, довговічність та механічні властивості модифікованої деревини [6]. Втрати маси, змочуваність, колір деревини та хімічні перетворення згодом були широко вивчені, тоді як необхідні роботи, що зосереджуються на контролі якості, моделюванні та вивченні причин поліпшень властивостей модифікованої деревини.

Термомодифікована деревина стає одним з кращих матеріалів для облицювання [7]. У зв'язку з цим проведено вимірювання вологості термічномодифікованих фасадів та встановлено низький вміст вологи в термічномодифікованій деревини в порівнянні з еталонною ялиною. Але не вказано, який був ступінь та режими модифікування деревини.

Більш широке використання термічномодифікованої деревини [8] призвело до необхідності надійного контролю якості, що включає контроль відхилень продукції в певних межах. Це дозволяє здійснювати контроль третьою стороною в разі сертифікації та регулювання скарг і вимог споживачів. Однак, не вказано які необхідні методи для характеристики зміни якості з точки зору поліпшених цільових властивостей модифікованої деревини під час промислового виробництва.

Проведено дослідження зміни набухання і шорсткості поверхні деревини вільхи звичайної й в'яза після термообробки при двох різних температурах і тривалості [9]. Встановлено, що параметри набухання і шорсткості поверхні суттєво різнилися для двох температур і двох тривалостей термообробки. Значення набухання і шорсткості поверхні зменшувалися зі збільшенням температури й часу обробки, але не вказані технологічні показники.

Характеристики деревини через погодні умови змінюються з часом, особливо колір, що відображає хімічні зміни [10]. Проведена оцінка зміни кольору і відбивної здатності дерев'яних поверхонь через штучне вивітрювання, отриманого за допомогою камери сонячного ящика, що імітує зовнішні умови і подальше вимивання води. Зі збільшенням часу вивітрювання необроблені поверхні зразків деревини темніють, тоді як модифіковані зразки світлішають, щоб мати схожий колір або, в будь-якому випадку, зменшувати хроматичну різницю, яка була на початку випробувань на атмосферостійкість.

Під час термічної обробки відбувається безліч хімічних реакцій, що призводять до змін в компонентах первинної клітинної стінки деревини і потемніння матеріалу. Серед інших змін термомодифікована деревина більш стійка до грибкового розпаду і стабільніша за властивостями, порівняно з необробленою, що робить його придатним для використання в приміщенні і

на відкритому повітрі в якості облицювання, настилів підлоги, садових меблів та віконних рам [11].

Лабораторні випробування показали позитивний вплив термічної модифікації на довговічність, стабільність розмірів і теплопровідність деревини [12]. Результати моніторингу показали, що елементи і вікна з термічномодифікованої ялини мають значно нижчий вміст вологи в деревині в порівнянні з вікнами з немодифікованої, і що віск також позитивно впливає на показники вологості.

Природне старіння, як правило, є відносно повільним процесом, тому штучне старіння відіграє важливу роль в оцінці результатів роботи шляхом скорочення часу, порівняно з природним умовами вивітрювання. Підхід полягає у захисті поверхні за допомогою різних видів комерційних продуктів такі як розчинники, що містяться у воді, з високим вмістом твердих речовин, порошкові покриття та продукти, що не містять речовин [13].

Одним з підходів є модифікація деревини, що передбачає сукупність процесів, які надають обробленому матеріалу більше здатність справлятися з пошкодженнями, спричиненими зовнішнім середовищем, шляхом збільшення тривалості оброблення. Процес також виконується для посилення фізичних, механічних або естетичних властивостей деревини, а похідні продукти не є шкідливими для користувачів та навколишнього середовища, як і натуральна деревина [14].

Таким чином, з літературних джерел встановлено, що термічне модифікування деревини здатне протистояти до руйнування. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого визначенню параметрів, які забезпечують стійкість до водопоглинання термічномодифікованою деревиною. Тому дослідження у цьому напрямі є невирішеною складовою забезпечення стійкості будівельних конструкцій, що і обумовило необхідність проведення досліджень.

Мета і задачі досліджень. Метою даної роботи є дослідження дифузії вологи деревиною і встановлення ефективності протидії поглинання води при термічному модифікуванні.

Матеріали і методи досліджень. Для встановлення дифузії вологи деревиною після термічного модифікування використовували зразки необробленої та термомодифікованої деревини граба розміром 25×20×20 мм. Термообробку деревини проводили за температури 200 °С протягом від 1 до 6 годин (рис. 1).

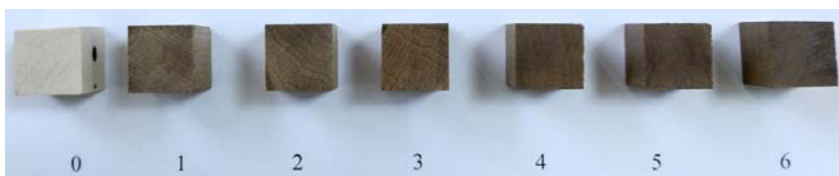


Рис. 1. Модельні зразки деревини граба для випробувань: 0 – необроблена; термооброблена за температури 200 °С протягом: 1 – 1 години; 2 – 2 годин; 3 – 3 годин; 4 – 4 годин; 5 – 5 годин; 6 – 6 годин

Для одержання значень дифузії вологи в деревині розроблено і виготовлено спеціальне обладнання (рис. 2).

Випробовуваний зразок закріплювали в спеціальній кюветі так щоб знаходився у вологому середовищі над водою (рис. 2).

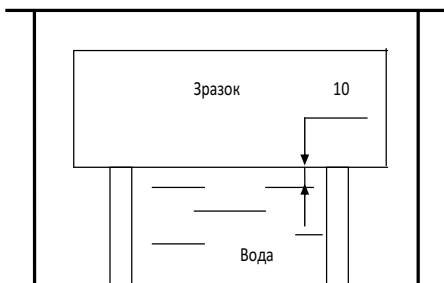


Рис. 2. Пристрій для випробувань на поглинання вологи деревиною.

Через певний проміжок часу, зразок зважували на вагах та визначали кількість поглинутої води.

Результати досліджень. В табл. 1 приведено результати дослідження водопоглинання деревини.

Таблиця 1

Результати експериментального визначення водопоглинання деревини

№ зразка	Час експозиції, діб									
	0	1	2	5	6	7	8	12	21	26
0	7,41	8,01	8,35	8,74	8,72	8,75	8,73	8,75	8,76	8,76
1	7,55	8,03	8,31	8,52	8,59	8,54	8,57	8,63	8,70	8,72
2	7,34	7,81	7,99	8,31	8,35	8,35	8,38	8,33	8,38	8,38
3	7,38	7,87	8,07	8,29	8,32	8,33	8,30	8,44	8,45	8,44
4	7,11	7,52	7,72	7,99	8,00	8,00	8,00	8,07	8,11	8,12
5	7,16	7,56	7,74	7,87	7,89	7,9	7,93	7,99	7,99	8,00
6	7,01	7,39	7,6	7,76	7,8	7,81	7,79	7,86	7,86	7,86

За отриманими експериментальними даними розраховано частку вологи в деревині, що було термомодифіковано, які наведено на рис. 2.

Після вимірювання тангенсу кута нахилу отриманої прямої, обчислено коефіцієнт дифузії (D) за відомих значеннях C_1 , $C_{\max}$ і h за залежністю:

$$D = \frac{h^2}{2} \cdot \frac{C_{\max}}{C_1} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (1)$$

який становить для деревини залежно від часу термомодифікації, табл. 2.

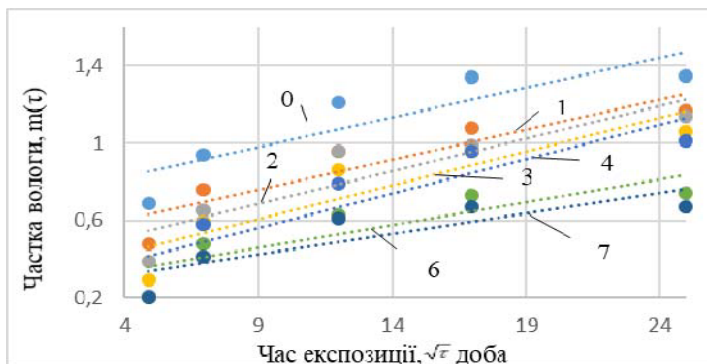


Рис. 4. Зміна водопоглинання термомодифікованої деревини: 0 – необроблена; термомодифікована за температури 200 °C протягом: 1 – 1 години; 2 – 2 годин; 3 – 3 годин; 4 – 4 годин; 5 – 5 годин; 6 – 6 годин

Таблиця 2

Значення коефіцієнта дифузії при водопоглинанні термомодифікованої деревини

Показник	Час термічного модифікування деревини, годин						
	0	1	2	3	4	5	6
Коефіцієнт дифузії вологи, м ² /с	0,024916	0,00045	0,00044	0,00013	0,00011	0,00004	0,000006

Як видно з табл. 2 при термічному модифікуванні деревини протягом 6 годин водопоглинання знижується понад 10 разів, що дозволяє використовувати її на об'єктах з підвищеною вологою.

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено можливість на результатах експериментальних досліджень здійснювати розрахунки коефіцієнта дифузії вологи у деревину та встановлювати норми застосування будівельної конструкції. Результати досліджень дозволять також ціленаправлено вирішувати подальші задачі щодо створення нових засобів і

способів захисту органічних матеріалів та умов їх експлуатації на різних об'єктах.

1. Lo Monaco A., Pelosi C., Agresti G., Picchio R., Rubino G. (2020) Influence of thermal treatment on selected properties of chestnut wood and full range of its visual features. *Drewno*, 63 (205). pp. 5-24.
2. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. (2020) Determination of the laws of thermal resistance of wood in application of fire-retardant fabric coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/10 (104). pp. 13-18. doi: 10.15587/1729-4061.2020.200467.
3. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. (2020) Research of conditions of removal of fire protection from building construction. *Key Engineering Materials*, 864. pp. 141-148. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.864.141.
4. Tsapko Yu., Horbachova O., Tsapko A., Mazurchuk S., Zavialov D., Buisyskykh N. (2021) Establishing regularities in the propagation of phase transformation front during timber thermal modification. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10 (109). pp. 30-36. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225310.
5. Tsapko Yu., Rogovskii I., Titova L., Bilko T., Tsapko A., Bondarenko O., Mazurchuk S. (2020) Establishing regularities in the insulating capacity of a foaming agent for localizing flammable liquids. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/10 (107). pp. 51-57. doi: 10.15587/1729-4061.2020.215130.
6. Esteves B., Pereira H. (2009) Wood modification by heat treatment *Bioresources*, 4 (1). pp. 370-404.
7. Humar M., Lesar B., Kržišnik D. (2020) Moisture performance of façade elements made of thermally modified norway spruce wood. *Forests*, 11 (3). 348 p. doi: 10.3390/f11030348.
8. Humar M., Repič R., Kržišnik D., Lesar B. (2020) Quality control of thermally modified timber using dynamic vapor sorption (dvs) analysis. *Forests*, 11 (6). 666 p. doi: 10.3390/f11060666.
9. Aytin S., Korkut P. 2016 Effect of thermal treatment on the swelling and surface roughness of common alder and wych elm wood *Journal of Forestry Research*, 27 (1). pp. 225-229. doi: 10.1007/s11676-015-0136-7.
10. Pelosi G., Agresti L., Lanteri R., Picchio E., Gennari E., Lo Monaco A. (2020) Artificial weathering effect on surface of heat-treated wood of ayous. The 1st International Electronic Conference on Forests (IECF).
11. Ugovšek B., Šubic G., Humar M., Lesar B., Thaler N., Brischke C., Jones D., Lozano J.I. (2016) Performance of windows and façade elements made of thermally modified norway spruce (*picea abies*) in different climatic conditions. In *Proceedings of the WCTE 2016-World Conference on Timber Engineering*. doi: 10.1007/s11998-016-9871-8.
12. Ugovšek B., Šubic G., Starman J., Rep G., Humar M., Lesar B., Thaler N., Brischke C., Meyer-Veltrup L., Jones D., Häggström U., Lozano J.I. (2019) Short-term performance of wooden windows and facade elements made of thermally modified and non-modified Norway spruce in different natural environments. *Wood Material Science and Engineering*, 14. pp. 42-47.
13. Bonifazi G., Serranti S., Capobianco G., Agresti G., Calienno L., Picchio R., Lo Monaco A., Santamaria U., Pelosi C. (2017) Hyperspectral imaging as a technique for investigating the effect of consolidating materials on wood. *Journal of Electronic Imaging*, 26 (1). 011003.
14. Jones D., Sandberg D., Goli G., Todaro L. (2019) Wood Modification in Europe: a state-of-the-art about processes, products and applications. 123 p.