

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ лісового і садово–паркового господарства**

<p>ПОГОДЖЕНО Директор ННІ Лісового і садово паркового господарства Роман ВАСИЛИШИН _____ (підпис) (ПІБ) « _____ » _____ 2025 р.</p>	<p>ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ Завідувач кафедри Технологій та дизайну виробів з деревини Андрій СПІРОЧКІН _____ (підпис) (ПІБ) « _____ » _____ 2025 р.</p>
---	---

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему «Дослідження впливу гідрофобізаторів на підвищення
вологостійкості деревини в сучасних деревообробних технологіях»

Спеціальність 187 «Деревообробні та меблеві технології»

Освітня програма «Деревообробні та меблеві технології»

Орієнтація освітньої програми освітньо–професійна

Гарант освітньої програми

канд. техн. наук, доц.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Андрій СПІРОЧКІН
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

канд. техн. наук, доц.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Олександра ГОРБАЧОВА
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Максим ЛАЗАРЧУК
(ПІБ)

Київ – 2025 рік

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ лісового і садово-паркового господарства**

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

Технологій та дизайну виробів з деревини
К.Т.Н., доц. _____ Андрій СПІРОЧКІН
науковий ступінь, вчене звання (підпис) (ПІБ)
«_____» _____ 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Лазарчуку Максиму Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 187 «Деревообробні та меблеві технології»

(код і назва)

Освітня програма «Деревообробні та меблеві технології»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Дослідження впливу гідрофобізаторів на підвищення вологостійкості деревини в сучасних деревообробних технологіях

затверджена наказом ректора НУБіП України від “05” 11 2024 р. № 1978 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи

Звіти з наукової роботи кафедри, результати лабораторних випробувань, технічні характеристики гідрофобізаторів та експериментальні дані щодо водопоглинання і набухання деревини

Перелік питань, що підлягають дослідженню

1. Проаналізувати гігроскопічну природу деревини та чинники, що впливають на її вологостійкість.
2. Вивчити сучасні методи захисту деревини від дії вологи.
3. Дослідити вплив гідрофобізатора на водопоглинання та деформаційну стабільність деревини.
4. Здійснити експериментальні вимірювання фізичних змін у деревині після різних методів.

Дата видачі завдання “_____” _____ 20__ р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

_____ Олександра ГОРБАЧОВА
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Максим ЛАЗАРЧУК
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Основна частина викладена на 67 сторінках, проілюстрована 21 рисунками та 28 таблицями. Список використаної літератури включає 52 джерела.

У вступі викладено доцільність та актуальність обраної теми, що зумовлена необхідністю підвищення довговічності дерев'яних виробів та їхнього захисту від руйнівного впливу вологи.

У першому розділі розглянуто теоретичні аспекти взаємодії деревини з вологою та природу її гігроскопічності. Проаналізовано вплив анатомічної будови різних порід (хвойних та листяних) на інтенсивність водопоглинання. Описано основні фактори, що впливають на стабільність деревини, та наведено порівняльну характеристику сучасних методів захисту. Акцентовано увагу на недоліках плівкоутворюючих покриттів і перевагах гідрофобізаторів, які зберігають паропроникність матеріалу та запобігають внутрішньому заправанню конструкцій.

У другому розділі проведено аналіз асортименту сучасних гідрофобізуючих засобів на ринку. Здійснено порівняння техніко–економічних характеристик п'яти комерційних продуктів за такими критеріями, як ціна, витрата матеріалу, час висихання та щільність. За допомогою методу аналізу ієрархій та експертних оцінок визначено пріоритетність кожного засобу. На основі розрахунків обґрунтовано вибір найефективнішого гідрофобізатора, який було рекомендовано для подальших експериментальних досліджень.

У третьому розділі описано методику та результати експериментальних випробувань на зразках сосни. Досліджено вплив різних способів нанесення захисної речовини (глибинне просочення та поверхнєве нанесення) на показники водо– та вологопоглинання. Порівняння результатів з контрольними зразками та традиційною лляною олією показало, що обробка гідрофобізатором забезпечує значно вищий рівень захисту. Встановлено, що метод занурення демонструє

найкращі показники вологостійкості, створюючи надійний бар'єр проти проникнення води.

У четвертому розділі наведено обґрунтування технологічної доцільності вибору методу нанесення для промислового застосування. Доведено, що для зовнішніх конструкцій поверхнева обробка є достатньою для утримання вологості деревини на безпечному рівні, що запобігає біологічному руйнуванню, і водночас є економічно вигіднішою за метод занурення. Висвітлено естетичні переваги використання гідрофобізаторів, зокрема їхню здатність зберігати натуральний колір і текстуру деревини, що робить їх оптимальним рішенням для реставрації та декоративного оздоблення.

Дослідження показало, що застосування сучасних гідрофобізаторів є ефективним методом захисту деревини.

Ключові слова: деревина, гідрофобізатор, вологостійкість, водопоглинання, захист деревини, гігроскопічність, глибинне просочення, поверхнева обробка, паропроникність, стабільність розмірів.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВОЛОГОСТІЙКОСТІ ДЕРЕВИНИ ТА МЕТОДИ ЇЇ ЗАХИСТУ.....	8
1.1. Вологостійкість деревини різних порід.....	8
1.2. Техніки захисту деревини від вологи.....	14
1.3. Умови стабільності дерев'яних конструкцій.....	17
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ АСОРТИМЕНТУ ТА ПАРАМЕТРІВ ГІДРОФОБІЗАТОРІВ	21
2.1. Аргументований опис гідрофобізаторів.....	21
2.2. Проведення досліджень щодо характеристик.....	24
2.3. Рішення багатокритеріальної задачі методом аналізу ієрархій.....	35
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОФОБІЗАТОРІВ НА ВОЛОГОСТІЙКІСТЬ ДЕРЕВИНИ.....	42
3.1. Матеріали та методика проведення експерименту.....	42
3.2. Дослідження впливу методу нанесення гідрофобізатора на показники водопоглинання деревини.....	46
3.3. Дослідження впливу методу нанесення гідрофобізатора на показники водопоглинання деревини.....	49
РОЗДІЛ 4 АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОФОБІЗАТОРІВ.....	52
4.1. Обґрунтування технологічної доцільності вибору методу нанесення гідрофобізатора.....	52
4.2. Порівняння характеристик гідрофобізатора “Віртуоз ФМ-11” та олії “Danish Oil”.....	53
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку будівництва, меблевої та столярної промисловості все більшої актуальності набуває питання підвищення довговічності деревини як природного конструкційного матеріалу. Попри численні переваги – легкість обробки, естетичність, екологічність – деревина має низку суттєвих недоліків, серед яких одним із головних є її чутливість до вологи. При зволоженні деревина вбирає воду, що призводить до розбухання, викривлення, зниження міцності, а при тривалому зволоженні – до біологічного руйнування внаслідок розвитку грибків, плісняви, синяви [1].

Особливо це критично для виробів, що експлуатуються у нестабільному або вологому середовищі: фасади, віконні блоки, підлога, оздоблення лазень і ванних кімнат. У таких випадках звичайна лакофарбова обробка не завжди забезпечує необхідний рівень захисту, особливо при механічних пошкодженнях плівки. В даній роботі аналізуючи гідрофобізатори як засоби захисту деревини, можна відзначити їхню високу ефективність у зниженні водопоглинання матеріалу без порушення його природної структури. Такий підхід забезпечує підвищення експлуатаційної стабільності деревини в умовах змінної вологості та продовжує термін служби конструкцій без шкоди для їхніх естетичних і функціональних характеристик.

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження впливу гідрофобізаторів на показники вологостійкості деревини та визначення доцільності їх використання у технологічних процесах деревообробного виробництва.

Завдання:

- проаналізувати гігроскопічну природу деревини та чинники, що впливають на її вологостійкість;
- вивчити сучасні методи захисту деревини від дії вологи;
- дослідити вплив гідрофобізатора на водопоглинання та деформаційну стабільність деревини;

- здійснити експериментальні вимірювання фізичних змін у деревині після різних методів обробки;
- сформулювати практичні висновки та рекомендації щодо ефективності гідрофобізаторів у промислових умовах.

Об'єктом дослідження є деревина, що підлягає впливу змінної вологості в умовах експлуатації.

Предмет дослідження – вплив гідрофобізаторів на показники вологостійкості деревини

Методи дослідження – було використано систематизацію наукових джерел для аналізу стану проблеми, порівняльний аналіз фізико–хімічних та економічних показників для обґрунтування вибору гідрофобізатора, використано експериментальний метод дослідження, під час якого визначали показники водо– і вологопоглинання деревини.

Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні технологічної та економічної доцільності використання методу гідрофобізації для захисту зовнішніх дерев'яних конструкцій.

Новизна методу полягає у фундаментальній зміні механізму захисту деревини, замість створення суцільного фізичного бар'єра плівки у вигляді плівки, застосовується принцип поверхневої модифікації капілярно–пористої структури.

У роботі представлено теоретичний аналіз вологостійкості деревини, методів її гідрофобного захисту, а також практичне дослідження зміни властивостей деревини після обробки гідрофобізаторами. У дослідній частині виконано вимірювання водопоглинання та поведінки деревини в умовах вологи.

За результатами даної роботи опубліковано тези доповіді «Щодо можливості зниження гігроскопічності деревини». Апробацію викладених досліджень здійснено на 78-й Всеукраїнській науково-практичній студентській конференції «Науковий пошук молоді для сталого розвитку лісового комплексу та садово-паркового господарства».

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВОЛОГОСТІЙКОСТІ ДЕРЕВИНИ ТА МЕТОДИ ЇЇ ЗАХИСТУ

1.1. Вологостійкість деревини різних порід

Вологостійкість – одна з ключових характеристик, що визначає придатність деревини до експлуатації в умовах змінної або підвищеної вологості. Різні породи деревини істотно відрізняються між собою за здатністю протистояти зволоженню, що зумовлено їхньою анатомічною будовою, щільністю, вмістом смол і екстрактивних речовин [2]. Розуміння вологостійкості конкретної породи дозволяє обґрунтовано підбирати матеріал для зовнішніх і внутрішніх конструкцій, визначати необхідність додаткової обробки та прогнозувати поведінку деревини в умовах експлуатації. У цьому підрозділі розглянуто фактори, які впливають на вологостійкість деревини, а також наведено порівняння найбільш поширених порід за цим показником [3].

Гігроскопічність деревини – це здатність матеріалу вбирати вологу з навколишнього середовища або віддавати її в залежності від відносної вологості повітря. Ця властивість зумовлена пористою будовою деревини, що складається клітинних стінок, у яких містяться гідрофільні групи, зокрема гідроксильні ($-OH$), що активно зв'язують молекули води [4].

Молекули води можуть проникати як у пори деревини, так і зв'язуватися з внутрішніми структурами клітинної стінки, що веде до її набухання. При зменшенні вологості навколишнього повітря вода випаровується, клітинні стінки деревини зсихаються. Ці коливання призводять до тріщин, деформацій, а з часом – до погіршення експлуатаційних характеристик дерев'яних виробів [5].

Вологостійкість деревини визначає її здатність протистояти проникненню, накопиченню і втраті вологи. Цей показник має надзвичайно важливе значення при проєктуванні елементів конструкцій, що працюють в умовах підвищеної

вологості: фасади, віконні рами, тераси, паркани, лазні, меблі для ванних кімнат, тощо [6].

Розглянемо фактори, що безпосередньо впливають на вологостійкість деревини.

1. Анатомічна структура деревин.

Деревина є клітинним матеріалом, і її будова прямо визначає характер руху вологи. У хвойних порід, таких як сосна чи ялина, основними водопровідними елементами є трахеїди, які мають менший діаметр і розташовані більш компактно, ніж судини у листяних порід (рис. 1.1). Це зменшує капілярну провідність деревини та підвищує її опір до вологи [7].

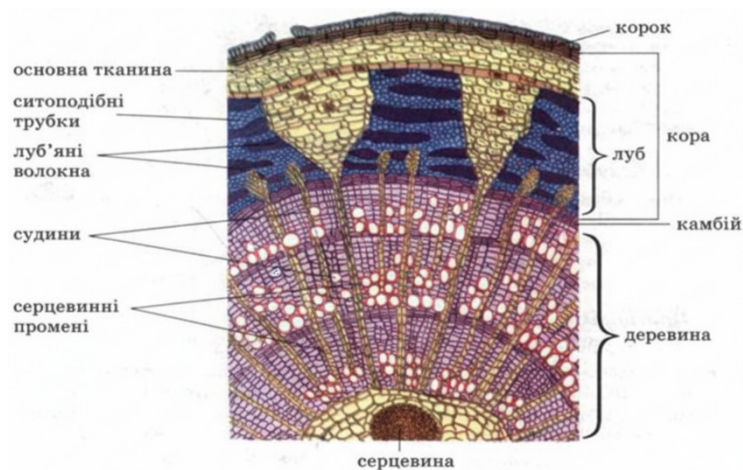


Рис. 1.1. Анатомічна будова стовбура дерева [7]

У листяних порід дерев значно впливає на здатність вбирати вологу. Наприклад, у дуба та ясеня судини досить широкі, тому вода швидко проникає в їхню структуру. Це полегшує просочування деревини захисними засобами, але одночасно підвищує ризик швидкого зволоження в природних умовах. У деревині берези судини дрібніші та більш рівномірно розподілені по всьому перетину, тому вона поглинає вологу повільніше, але рівномірніше. Особливістю дуба є те, що його судини розташовані концентричними кільцями (рядами), які помітні навіть неозброєним оком. Це означає, що волога найчастіше рухається по цих лініях, а не рівномірно в усіх напрямках. Саме через це деякі частини дубової дошки можуть намокати швидше за інші, що призводить до нерівномірного набухання та деформацій. Розуміння цієї будови дуже важливе

при виборі способу захисту деревини та при її застосуванні в умовах підвищеної вологості [8].

2. Щільність і пористість деревини

Щільність деревини (г/см³) – один із найважливіших факторів, що впливає на її водопоглинання. Щільніші породи мають менше пор, і тому волога проникає в них повільніше (табл. 1.1). Наприклад дуже пориста деревина (тополя, верба) вбирає вологу як губка, і тому без обробки непридатна для зовнішнього використання.

Таблиця 1.1

Щільність деревини

Порода	Середня щільність, г/см ³	Клас вологостійкості
Верба	0.40-46	Низький
Сосна	0,47-0,52	Середній
Береза	0,60-0,65	Середній
Дуб	0,69-0,75	Високий
Тік	0,60-0,70	Дуже високий

3. Хімічний склад деревини

Деревина складається з целюлози, геміцелюлози, лігніну і екстрактивних речовин. Саме останні відіграють важливу роль у вологостійкості.

Наприклад, модрина сибірська має високу кількість природної смоли, яка після висихання частково герметизує капіляри, знижуючи змочуваність поверхні та уповільнюючи проникнення вологи шари деревини (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Дошка сибірська модрина [9]

4. Напрямок волокон і анізотропія

Деревина є анізотропним матеріалом, її властивості змінюються залежно від напрямку відносно волокон (рис. 1.3).

- Вздовж волокон: найнижча швидкість водопоглинання.
- Радіальний напрямок: середнє водопоглинання.
- Тангенціальний напрямок: найвища здатність до набухання і втрати форми.

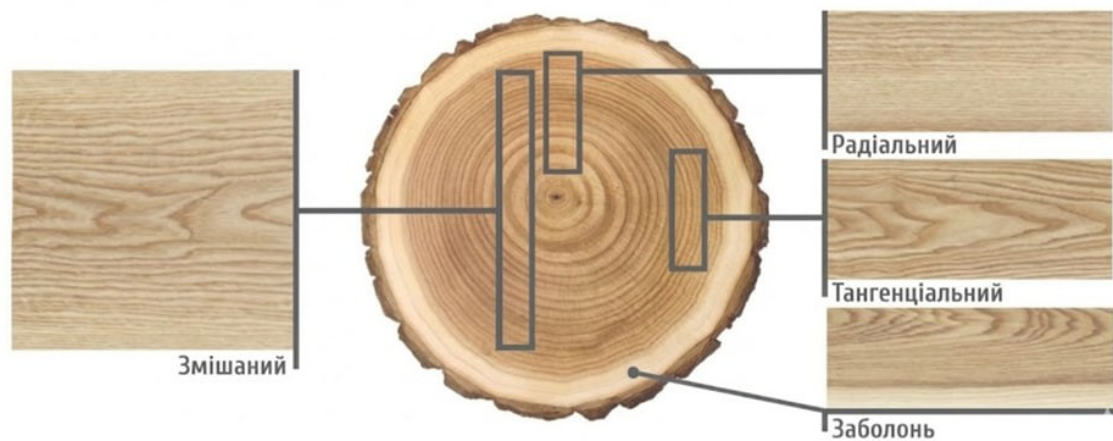


Рис. 1.3. Радіальний та тангенціальний розпил

Саме тому у деревообробці приділяють увагу напрямку зрізу при виготовленні відповідальних конструкцій, особливо фасадних елементів, де ризик розбухання – критичний [10].

5. Стан вологи та рівноважна вологість

Вологість деревини – це вміст води в ній, який вимірюється у відсотках від маси абсолютно сухої деревини. Вона буває вільною (легко випаровується) і зв'язаною. Зв'язана волога знаходиться в клітинних стінках деревини та утримується завдяки хімічним зв'язкам. Вільна (капілярна) волога міститься у просвітах клітин і порожнинах деревини.

Точка насичення волокон визначається як критичний поріг вологості в межах 25–30 %. Перевищення цього рівня вже не призводить до зміни геометричних розмірів деревини, проте створює сприятливі умови для біологічної деструкції матеріалу. Натомість у діапазоні до цієї позначки вміст вологи безпосередньо корелює з фізико–механічними показниками, суттєво змінюючи міцність, пружність та зносостійкість деревини [11].

Рівноважна вологість – це стабільний стан деревини, при якому її волога відповідає вологості повітря. Для більшості житлових приміщень вона коливається в межах 8–12 %. В умовах зовнішнього середовища може досягати 20 % і більше, використання гідрофобізаторів стає необхідним [12].

6. Спосіб сушіння та попередня обробка

Сушіння деревини дозволяє знизити вологість до експлуатаційного рівня. Але швидке сушіння може призвести до утворення тріщин, внутрішніх напружень і зон із різною вологістю.

Повільне сушіння забезпечує рівномірне зменшення вологи, але є менш енергоефективним.

Камерне сушіння дозволяє отримати стабілізований матеріал у контрольованих умовах, який краще чинить опір вторинному зволоженню, особливо за умови подальшої захисної обробки (рис. 1.4.). Деревина, яка була просушена та стабілізована, краще чинить опір вторинному зволоженню, особливо якщо одразу після сушіння оброблена захисним просоченням або покриттям [13].

Вибір породи деревини для експлуатації в умовах змінної або підвищеної вологості є критично важливим фактором, що визначає довговічність і надійність дерев'яних конструкцій. Різні породи деревини відрізняються за своєю

природною вологостійкістю внаслідок анатомічної будови, щільності, вмісту екстрактивних речовин та інших властивостей.



Рис. 1.4. Конвективна сушильна камера [14]

Хвойні породи, зокрема сосна, ялина, модрина та кедр, мають високу поширеність завдяки своїй доступності, легкості в обробці та помірній вартості. Їх анатомічна будова характеризується відносно дрібними трахеїдами, що забезпечують нижчу капілярну провідність у порівнянні з листяними породами.

Сосна має помірну вологостійкість, проте піддається синяві й грибковому ураженню при тривалому зволоженні. Потребує обов'язкової обробці при використанні на відкритому повітрі.

Модрина має підвищений вміст смоли, що забезпечує їй природну вологостійкість навіть без просочення. Часто використовується для зовнішніх робіт (тераси, фасади).

Ялина менш стійка до вологи через нижчий вміст смол, потребує ретельного сушіння та захисту [15].

Листяні породи мають більш складну анатомічну будову – наявність судин великих діаметрів забезпечує інтенсивне поглинання вологи. Це робить їх менш стійкими до зовнішнього зволоження без відповідної обробки.

Дуб відноситься до порід з умовно високою вологостійкістю. Його судини містять таніни, які частково протистоять грибкам. Проте у необробленому вигляді дуб легко вбирає вологу через відкриту судинну структуру.

Бук має високу щільність, але при цьому – низьку природну вологостійкість. Він швидко вбирає вологу і потребує обов’язкової гідроізоляції.

Береза – одна з найменш вологостійких порід. Вона схильна до деформацій і розтріскування при зміні вологості. [15].

Деякі екзотичні породи мають унікальні властивості завдяки високому вмісту природних масел і смол.

Тік – одна з найстійкіших порід до вологи та біологічного руйнування. Завдяки вмісту натуральних масел не потребує додаткової обробки. Використовується в суднобудуванні та для меблів у вологих приміщеннях.

Для конструкцій в умовах високої вологості (лазні, фасади, підлоги на відкритому повітрі) використання захисту деревини є обов’язковим, незалежно від породи [16].

1.2. Техніки захисту деревини від вологи

Волога є одним із головних чинників руйнування деревини при експлуатації в природних умовах. Під впливом води деревина змінює свої фізико–механічні властивості, зазнає набухання, деформацій, втрачає міцність, а при тривалому зволоженні – уражається пліснявою та грибками. З метою збереження розмірної стабільності, зовнішнього вигляду та функціональності виробів із деревини у деревообробній галузі застосовують різноманітні захисні технології. До них належать як традиційні методи (фарбування, лакування), так і сучасні високотехнологічні засоби (гідрофобізація, полімерні покриття, імпрегнація) [17].

Плівкоутворюючі речовини є основним елементом у складі захисно-декоративних матеріалів, які утворюють на поверхні деревини тонкий бар’єр. Саме плівка, яка формується після висихання або полімеризації цих речовин, забезпечує механічну міцність, еластичність, водостійкість та адгезію до деревини. До найпоширеніших плівкоутворювачів відносять алкідні, акрилові, епоксидні, поліуретанові, поліефірні та нітроцелюлозні смоли. Їхні властивості

визначають тип покриття прозоре чи непрозоре, матове або глянцеве, жорстке або еластичне (рис. 1.5).



а

б

Рис. 1.5. Приклад лакофарбового покриття: а) глянцеве б) напівматове [18]

Залежно від обраного плівкоутворювача, покриття може мати високу паропропусність та водостійкість, стійкість до стирання, впливу ультрафіолетового випромінювання та коливань температури [19].

Окрім типу плівкоутворювача, важливу роль відіграє технологія нанесення покриття – пензлем, розпиленням, зануренням або в промислових умовах – у камерах гарячого сушіння (рис. 1.6) У деяких випадках застосовується багатошарова система захисту, яка поєднує ґрунтовку, проміжний та фінішний шари для досягнення максимальної волого- та біостійкості [19].



а

б

в

Рис. 1.6. Технологія нанесення покриття: а) занурення б) розпилення

в) нанесення пензлем [20–23]

Природні смоли – це органічні речовини рослинного походження, які здавна застосовувалися як захисні та декоративні покриття для деревини. Вони добуваються переважно з хвойних дерев (наприклад, сосни, модрина) та мають добрі водовідштовхувальні властивості. До найбільш поширених належать каніфоль, сандарак, даммар, шелак, бурштин та копали.

Грунтовки – це спеціальні рідкотекучі матеріали, які наносяться на поверхню деревини перед фінішним оздобленням (фарбуванням, лакуванням, нанесенням полімерних покриттів). Їхнє головне призначення – підвищити адгезію наступного шару до основи, зменшити пористість деревини, забезпечити більш рівномірне поглинання фінішного покриття, а також захистити деревину від вологи та біологічних уражень [24].

Порозаповнювачі – це спеціальні пастоподібні або рідкі склади, призначені для заповнення відкритих пор, судин та нерівностей на поверхні деревини перед нанесенням фінішного покриття. Їх основне завдання – створити рівну, щільну основу, яка зменшує поглинання лаків або фарб, забезпечує гладку поверхню та покращує зовнішній вигляд покриття.

Особливо актуальне використання порозаповнювачів при роботі з пористими породами деревини, такими як дуб, ясень, каштан, бук. У таких випадках без попереднього заповнення пор поверхня після лакування залишається нерівною, з видимими заглибленнями в зоні судин [25].

Шпаклівки та замазки застосовуються для усунення дефектів поверхні деревини перед її фінішною обробкою – лакуванням, фарбуванням або нанесенням декоративних покриттів. Їх основна функція – заповнення тріщин, щілин, вм'ятин, сучків, отворів від цвяхів та інших пошкоджень, з метою отримання рівної та однорідної поверхні.

Шпаклівки, як правило, мають тонку, гладку консистенцію й наносяться на великі площини, де важлива рівномірність і естетика. Замазки ж зазвичай грубіші за складом і використовуються для глибших ушкоджень або заповнення масивних тріщин [26].

Олії – завдяки глибокому проникненню в пори деревини, забезпечують вологовідштовхувальний ефект, зберігаючи при цьому природну текстуру та колір деревини. Оброблені матеріали мають матовий або шовковистий блиск, приємну на дотик поверхню, підкреслюють фактуру деревини й забезпечують базовий захист від вологи, пилу та механічних ушкоджень [27].

1.3. Умови стабільності дерев'яних конструкцій

Стабільність дерев'яних конструкцій є критично важливою умовою їхньої надійності, довговічності та безпечної експлуатації. Зміни вологості навколишнього середовища безпосередньо впливають на поведінку деревини. Розглянемо основні чинники, що впливають на стабільність деревини, характерні види деформацій, методи їх оцінки, а також роль гідрофобізаторів у зменшенні негативного впливу вологи на дерев'яні конструкції. Наведено також практичні приклади порушення стабільності, які виникають при недотриманні захисних технологій [28].

Волога є одним з основних факторів, що впливає на стабільність та довговічність дерев'яних конструкцій. Через гігроскопічну природу деревини її фізико–механічні властивості значною мірою залежать від вмісту вологи в структурі матеріалу. Підвищення вологості деревини призводить до зниження її міцності, появи деформацій, набухання, а також до розвитку біологічних пошкоджень [29].

Із зростанням вологості понад точку насичення волокон (25-30 %) деревина втрачає значну частину своїх механічних характеристик. Такі втрати є критичними для конструкцій, що сприймають навантаження, особливо у відкритому середовищі – дахах, фасадах, терасах, де коливання вологості є постійним явищем.

Набухання та усадка деревини виникають у результаті проникнення вологи в клітинні стінки, що викликає їх набрякання та збільшення розмірів деревини. При висиханні, навпаки, відбувається зменшення об'єму – усадка. Ці

процеси призводять до викривлення конструктивних елементів (рис. 1.7), утворення тріщин і навіть розшарування клеєних з'єднань [30].



Рис. 1.7. Викривлення конструкційного елементу [31]

Це особливо небезпечно у відповідальних конструкціях – віконних рамах, підлогах, зовнішніх облицювальних елементах, де навіть невеликі зміни геометрії можуть призвести до зниження функціональності або повної втрати експлуатаційної придатності [31].

Крім механічних і геометричних проблем, надмірна вологість створює сприятливі умови для розвитку біологічного ураження деревини (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Ураження необроблених дошок грибком [34]

Підвищена вологість є деструктивним фактором, що знижує міцність деревини, порушує її геометрію, провокує тріщиноутворення та біокорозію. Саме тому важливим завданням сучасних деревообробних технологій є мінімізація вологопоглинання шляхом захисної обробки деревини перед її використанням у відповідальних конструкціях [33].

При вологості понад 20–22 % активно розвиваються грибки, пліснява, синява, а також інші мікроорганізми. Їхня життєдіяльність призводить до зниження несучої здатності деревини, появи плям, неприємного запаху, а в подальшому – до швидкого руйнування матеріалу. Такі наслідки особливо небезпечні в умовах високої вологості, коли деревина не має додаткового захисту або неправильно експлуатується [32].

Однією з ключових причин зниження стабільності деревини є її висока гігроскопічність – здатність вбирати вологу з повітря або при прямому контакті з водою (рис. 1.9). Це викликає низку небажаних ефектів: набухання, усадку, деформації, втрату міцності, біологічні ураження. У таких умовах гідрофобізація є ефективним способом підвищити водоостійкість деревини і стабілізувати її експлуатаційні властивості зберігаючи паропроникні властивості та зберігають натуральну текстуру і колір [35].

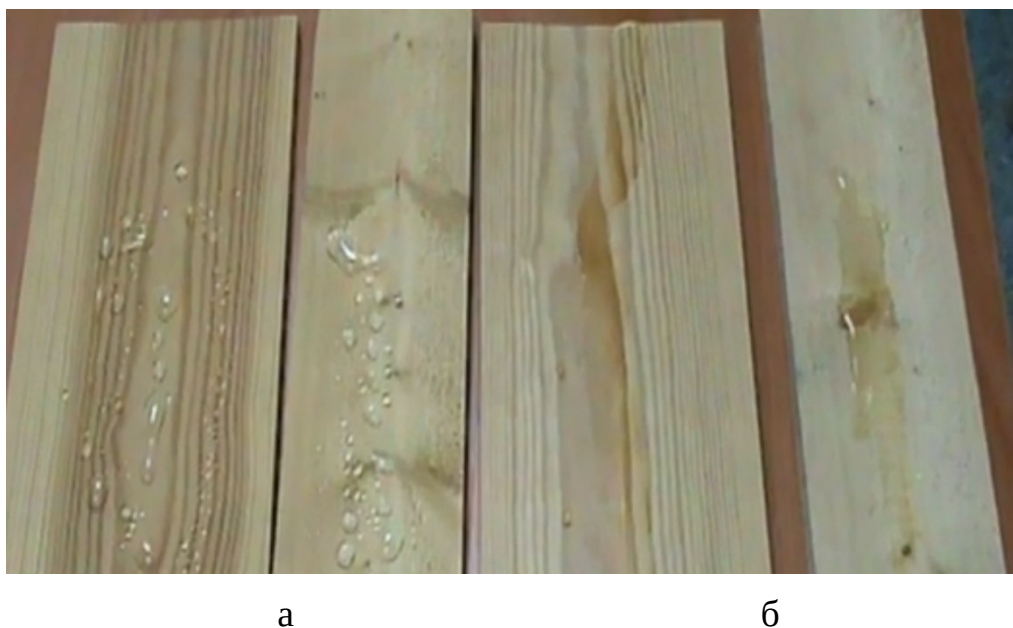


Рис. 1.9. Захист деревини: а) зразки з нанесеним гідрофобізатором;
б) зразки без захисту [36]

Здійснено теоретичний аналіз природи вологопоглинання деревини, факторів, що впливають на її вологостійкість, сучасних методів захисту та стабілізації.

Стійкість до вологи значною мірою залежить від породи деревини: щільність, анатомічна будова, вміст екстрактивних речовин і напрям волокон визначають інтенсивність поглинання та стійкість до зволоження. Хвойні породи (особливо модрина) мають вищу природну вологостійкість, ніж листяні.

Фізико–механічні властивості деревини суттєво змінюються під впливом вологи та проявляються у зниженні міцності, деформаціях, розшаруваннях і появі тріщин, що вимагає ретельного підходу до вибору захисту [37].

Гідрофобізатори сприяють підвищенню стабільності деревини в умовах змінної вологості завдяки зменшенню вологопоглинання, тим самим покращенню збереження геометричних розмірів, зниженню ймовірності біологічного ураження.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ АСОРТИМЕНТУ ТА ПАРАМЕТРІВ ГІДРОФОБІЗАТОРІВ

2.1. Аргументований опис гідрофобізаторів

Для подальшого теоретичного аналізу та багатокритеріального вибору було відібрано п'ять комерційних гідрофобізаторів:

1. «Праймер ЄС–67» (рис. 2.1) це сучасний гідрофобізатор на основі органосиліконів, призначений для забезпечення захисту деревини, від проникнення вологи. Його формула розроблена для глибокого проникнення у структуру оброблюваного матеріалу, створюючи стійкий водовідштовхувальний шар. Утворює атмосферостійке, гідрофобне покриття без зміни зовнішнього вигляду та утворення плівки, стійке до вивітрювання, руйнування, ультрафіолетового випромінювання. Просочення деревини запобігає проникненню води та маслоподібних забруднювачів у структуру деревини [38].



Рис. 2.1. Гідрофобізатор «Праймер ЄС–67» [39]

2. «OxiDom MineralSurface–240» (рис. 2.2) ефективно діючий, водовідштовхувальний (гідрофобізуючий) засіб, у концентрованій формі, призначенням якого є забезпечення поверхні водовідштовхувальними властивостями. Засіб використовують при обробці пористих будівельних матеріалів, керамічної плитки та силікатної цегли, мармуру, деревини, бетону, азбоцементу, тротуарної плитки тощо [40].



Рис. 2.2. Гідрофобізатор «OxiDom MineralSurface–240» [41]

3. «NANOPHOS SurfaPore W» (рис. 2.3) це спеціалізований розчин на водній основі, розроблений з використанням нанотехнологій для збереження властивостей дерев'яних поверхонь.



Рис. 2.3. Гідрофобізатор «NANOPHOS SurfaPore W» [44]

Комбінація активних компонентів гідрофобізатора захищає поверхню від водних та жирових забруднень, не змінює при цьому природного вигляду деревини. Забезпечує відмінну стабільність розмірів навіть у найвологіших

умовах, захист від деформації та руйнування (гниття) деревини. Плями від води та жиру не затримуються на обробленій поверхні і, як наслідок, не псують її [42].

4. «Віртуоз ФМ-11» (рис. 2.4) ефективно використовується для обробки деревини, надаючи їй захист від вологи, грибка, плісняви та інших несприятливих факторів. Завдяки проникненню гідрофобізатора в структуру дерева, матеріал стає більш стійким до впливу води, але зберігає свою природну текстуру і паропроникність [45].



Рис. 2.4. Віртуоз ФМ-11 [46]

5. «Ceresit СТ 13» (рис. 2.5) універсальний силіконовий гідрофобізатор для надання гідрофобних властивостей поверхням зі штучних і природних поглинаючих матеріалів. Забезпечує водозахисні властивості мінеральних основ з мікротріщинами шириною до 0,2 мм [47].



Рис. 2.5. Гідрофобізатор «Ceresit СТ 13» [48]

«Ceresit СТ 13» застосовується зовні та всередині приміщень. Не застосовується для гідрофобізації підлог, захисту будівельних конструкцій від ґрунтових вод, як гідроізоляція, для захисту поверхонь із полімерними покриттями [49].

2.2. Проведення досліджень щодо характеристик

З розглянутих гідрофобізаторів для захисту деревини від вологи, для порівняння та визначення пріоритету вибрано по 5 ключових усереднених характеристик для кожного з 5 гідрофобізаторів, як вказано в табл. 2.1.

Під час оцінки та якісного порівняння п'яти різних гідрофобізаторів, створені квадратні матриці бінарних відношень розміром 5x5. У цих матрицях "m" представляє характеристики завіс, "n" – види антисептиків, отже, розмірність матриці – 5x5. Взаємовідносини між характеристиками та видами гідрофобізаторів виражаються математичними символами: "більше" – ">", "дорівнює" – "=", "менше" – "<" [43].

Далі проводиться порівняння показників за їх пріоритетністю під час оцінки характеристик. Для цього порівняння створено ще одну квадратну матрицю розміром m x n [43].

Таблиця 2.1

Основні характеристики обраних гідрофобізаторів

Гідрофобізатори для деревини	Витрата мл/м ²	Мінімальна температура нанесення °С	Час висихання год.	Щільність г/см ³ ;	Ціна грн/л.
«Праймер ЄС-67»	175	10	8	0,87	993
«OxiDom MineralSurface-240»	225	15	24	0,97	180
«NANOPHOS SurfaPore W»	115	10	18	0,75	1080
«Віртуоз ФМ-11»	225	5	24	0,77	243
«Ceresit СТ 13»	150	5	12	1,00	495

Для визначення кількісної оцінки для кожного показника спочатку визначено, яке значення є серед об'єктів, і наскільки це значення відрізняється від найгіршого об'єкта K_{ij} [43]:

$$K_{ij} = \frac{X_{ijmax}}{X_{ijmin}}, \quad (2.1)$$

де X_{ijmax} – максимальна оцінка і-того об'єкта по j-му показнику;

X_{ijmin} – мінімальна оцінка і-того об'єкта по j-му показнику.

Після знаходження коефіцієнта відношення K_i , визначають коефіцієнт переваги ω_{ij} [32]:

$$\omega_{ij} = \left(\frac{K-1}{K+1} + \sqrt{\frac{0,05}{n}} \right), \quad (2.2)$$

Далі визначають члени A_j матриць суміжності A_j , які заміняють матриці бінарних відношень. Члени A_j матриць суміжності A_j позначаються як $A_j = \| A_{ij} \|$ і визначаються наступним способом [6]:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 + \omega \text{ при } X_{ij} > X_{ej} \\ 1 \text{ при } X_{ij} = X_{ej} \\ 1 - \omega \text{ при } X_{ij} < X_{ej} \end{cases}, \quad (2.3)$$

$$A_i = \begin{pmatrix} \alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1i}, \dots, \alpha_{1n}, \\ \alpha_{21}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{2i}, \dots, \alpha_{2n} \\ \dots \\ \alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ii}, \dots, \alpha_{in} \\ \dots \\ \alpha_{n1}, \alpha_{n2}, \dots, \alpha_{ni}, \dots, \alpha_{nn} \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

Математичні символи ($>$), ($=$) та ($<$) замінюються значеннями α_{ij} [6].

Аналогічним чином складено матриці бінарних відношень для порівняння норми витрат мл/м² (табл. 2.2.).

Показник витрати мл/м² вказує на те скільки буде витрачено гідрофобізатора для обробки одного м² поверхні деревини. Чим вищий цей показник, тим гірше, оскільки це означає, що потрібно витратити більше розчину, для обробки деревини

Таблиця 2.2

Матриця порівняння гідрофобізаторів за витратою мл/м²

		X1	X2	X3	X4	X5	К	ω
		175	225	115	225	150		
X1	175	=	<	>	<	>	1,95	0,42
X2	225	>	=	>	=	>		
X3	115	<	<	=	<	<		
X4	225	>	=	>	=	>		
X5	150	<	<	>	<	=		

Для обчислення кількісних оцінок використовують числові оцінки, надані експертами для кожної характеристики. Значення K_j обчислюються за формулою (2.1), що дозволяє визначити різницю між найкращим та найгіршим показником. Розрахувавши коефіцієнт K_j , розраховують коефіцієнт ω_j , за формулою (2.2).

Цей метод дозволяє визначити значення коефіцієнтів K_j та ω_j , використовуючи дані з табл. 2.3 – 2.6 та формули (2.1) і (2.2). Мінімальна температура нанесення – це найнижча температура, за якої гідрофобізатор може бути ефективно нанесений на поверхню, зберігаючи свої функціональні властивості.

Таблиця 2.3

Матриця порівняння гідрофобізаторів за мінімальною температурою нанесення

		X1	X2	X3	X4	X5	К	ω
		10	15	10	5	5		
X1	10	=	>	=	<	<	3	0,60
X2	15	<	=	<	<	<		
X3	10	=	>	=	<	<		
X4	5	>	>	>	=	=		
X5	5	>	>	>	=	=		

Цей параметр є важливим технічним показником, який визначає умови застосування засобу. Чим менша температура нанесення тим краще. Це означає, що засіб можна наносити навіть при похолоданнях.

Таблиця 2.4

Матриця порівняння гідрофобізаторів за часом висихання (год.)

		X1	X2	X3	X4	X5	К	ω
		8	24	18	24	12		
X1	8	=	>	>	>	>	3	0,60
X2	24	<	=	<	=	<		
X3	18	<	>	=	>	<		
X4	24	<	=	<	=	<		
X5	12	<	>	>	>	=		

Показник часу висихання вказує скільки часу необхідно для того, щоб гідрофобізатор після нанесення на поверхню сформував стійкий шар і став придатним для подальшої експлуатації. Чим менше час висихання ти краще.

Показник щільності характеризує масу речовини в одиниці об'єму і вимірюється у грамах на кубічний сантиметр (г/см³). Для гідрофобізаторів цей показник є важливим, оскільки він впливає на проникність, витрату матеріалу та його ефективність.

Таблиця 2.5

Матриця порівняння гідрофобізаторів за щільністю г/см³

		X1	X2	X3	X4	X5	К	ω
		0,87	0,97	0,75	0,77	1,00		
X1	0,87	=	<	>	>	<	1,33	0,24
X2	0,97	>	=	>	>	<		
X3	0,75	<	<	=	<	<		
X4	0,77	<	<	>	=	<		
X5	1,00	>	>	>	>	=		

Нижча щільність сприяє кращому проникненню в пористі матеріали, такі як деревина, бетон, цегла або штукатурка, але може потребувати більшої кількості шарів для забезпечення належного захисту. Чим щільніша тим краще.

Таблиця 2.6

Матриця порівняння гідрофобізаторів за ціною

		X1	X2	X3	X4	X5	К	ω
		993	180	1080	243	495		
X1	993	=	<	>	<	<	6	0,81
X2	180	>	=	>	>	>		
X3	1080	<	<	=	<	<		
X4	243	>	<	>	=	>		
X5	495	>	<	>	<	=		

Показник ціна гідрофобізатора визначає його доступність для конкретного типу робіт і часто корелює з його якістю та ефективністю. Нижча ціна робить препарат більш доступнішим.

Для визначення пріоритетів кожного гідрофобізатора за кожною характеристикою P_{ij} і пріоритету самого показника P_j , впроваджується поняття потужності критерію L -го порядку $P(L)$, що розраховується по рядках [43]:

Перша ітерація:

$$P_i(1) = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad (2.5)$$

$$P_j(1) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (2.6)$$

$$P_{ij}(1) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (2.7)$$

Друга ітерація:

$$P_j(2) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (2.8)$$

$$P_{ij}(2) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (2.9)$$

Третя ітерація:

$$P_j(3) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (2.10)$$

$$P_{ij}(3) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (2.11)$$

За допомогою цього методу розраховано та заповнено табл. 2.7 – 2.11.

Таблиця 2.7

Матриця суміжності для порівняння витрати

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _{i 1}	P _{i 1*}	P _{i 2}	P _{i 2*}	P _{i 3}	P _{i 3*}
		175	225	115	225	150								
X1	175	1	0,58	1,42	0,58	1,42	1,95	0,42	5	0,20	22,88	0,19	107,5 6	0,19
X2	225	1,42	1	1,42	1	1,42			6,26	0,25	30,24	0,26	142,5 8	0,26
X3	115	0,58	0,58	1	0,58	0,58			3,32	0,13	15,89	0,13	75,29	0,13
X4	225	1,42	1	1,42	1	1,42			6,26	0,25	30,24	0,26	142,5 8	0,26
X5	150	0,58	0,58	1,42	0,58	1			4,16	0,17	19,04	0,16	89,96	0,16
								Σ	25,00	1,00	118,3 0	1,00	557,9 7	1,00

Таблиця 2.8

Матриця суміжності для порівняння мінімальної температури нанесення

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _{i 1}	P _{i 1*}	P _{i 2}	P _{i 2*}	P _{i 3}	P _{i 3*}
		10	15	10	5	5								
X1	10	1	1,6	1	0,4	0,4	3	0,6	4,4	0,18	18,40	0,16	80,77	0,16
X2	15	0,4	1	0,4	0,4	0,4			2,6	0,10	11,56	0,10	51,75	0,10
X3	10	1	1,6	1	0,4	0,4			4,4	0,18	18,40	0,16	80,77	0,16
X4	5	1,6	1,6	1,6	1	1			6,8	0,27	31,84	0,28	141,06	0,28
X5	5	1,6	1,6	1,6	1	1			6,8	0,27	31,84	0,28	141,06	0,28
								Σ	25,00	1,00	112,0	1,00	495,40	1,00

			4			
--	--	--	---	--	--	--

Таблиця 2.9

Матриця суміжності для порівняння часу висихання

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W	P _{i 1}	P _{i 1*}	P _{i 2}	P _{i 2*}	P _{i 3}	P _{i 3*}
		8	24	18	24	12								
X1	8	1	1,6	1,6	1,6	1,6	3	0,6	7,4	0,30	35,56	0,32	156,78	0,32
X2	24	0,4	1	0,4	1	0,4			3,2	0,13	13,84	0,12	61,14	0,13
X3	18	0,4	1,6	1	1,6	0,4			5	0,20	20,68	0,19	90,15	0,18
X4	24	0,4	1	0,4	1	0,4			3,2	0,13	13,84	0,12	61,14	0,13
X5	12	0,4	1,6	1,6	1,6	1			6,2	0,25	27,40	0,25	119,00	0,24
Σ									25,00	1,00	$\frac{111,3}{2}$	1,00	488,20	1,00

Таблиця 2.10

Матриця суміжності для порівняння за щільністю

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W	P _{i 1}	P _{i 1*}	P _{i 2}	P _{i 2*}	P _{i 3}	P _{i 3*}
		0,87	0,97	0,75	0,77	1								
X1	0,87	1	0,76	1,24	1,24	0,76	1,33	0,24	5	0,20	24,31	0,20	$\frac{119,2}{4}$	0,20
X2	0,97	1,24	1	1,24	1,24	0,76			5,48	0,22	26,82	0,22	131,5	0,22

													1	
X3	0,75	0,76	0,76	1	0,76	0,76			4,04	0,16	19,97	0,16	98,04	0,16
X4	0,77	0,76	0,76	1,24	1	0,76			4,52	0,18	22,02	0,18	108,1 2	0,18
X5	1	1,24	1,24	1,24	1,24	1			5,96	0,24	29,57	0,24	145,0 5	0,24
Σ									25,00	1,00	122,7 0	1,00	601,9 6	1,00

Таблиця 2.11

Матриця суміжності для порівняння за ціною

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _i 1	P _i 1*	P _i 2	P _i 2*	P _i 3	P _i 3*
		993	180	1080	243	495								
X1	993	1	0,19	1,81	0,19	0,19	6	0,81	3,38	0,14	10,34	0,10	37,14	0,10
X2	180	1,81	1	1,81	1,81	1,81			8,24	0,33	38,58	0,39	147,50	0,41
X3	1080	0,19	0,19	1	0,19	0,19			1,76	0,07	6,18	0,06	23,77	0,07
X4	243	1,81	0,19	1,81	1	1,81			6,62	0,26	26,54	0,27	94,76	0,26
X5	495	1,81	0,19	1,81	0,19	1			5	0,20	17,13	0,17	59,39	0,16
Σ									25,00	1,00	98,76	1,00	362,56	1,00

Для розрахунку по методу експертної оцінки отримано оцінки експертів та занесено в табл. 2.12. Далі формулами (2.12 та 2.13) обчислено середнє значення \bar{x}_{ij} та середнє квадратичне відхилення S_{ij} по кожному ряду відповідей [43]:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{m}, \quad (2.12)$$

$$S_{ij} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2}{m-1}}, \quad (2.13)$$

де x_{ij} – оцінка j -го експерта по i -му питанню;

m – кількість експертів.

Далі розраховано коефіцієнт варіації V_{ij} за формулою [6]:

$$V_{ij} = \frac{S_{ij}}{\bar{x}_{ij}} \cdot 100\%, \quad (2.14)$$

Загальний коефіцієнт погодження експертів визначено за формулами нижче [43]:

$$K_E = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Eij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \quad (2.15)$$

$$K_{Eij} = 1 - \frac{S_{ij}}{\bar{x}_{ij}}, \quad (2.16)$$

де n – кількість характеристик в анкеті;

m_{ij} – кількість оцінок по кожній характеристиці в кожному з вирівняних рядів.

Якщо $0,5 \leq K_E \leq 1$, то думка експертів погоджена [43].

Для розрахунку по методу експертної оцінки отримано оцінки експертів та занесено в табл. 2.12

Таблиця 2.12

Результат експертної оцінки пріоритетів показників

Кількість експертів	Базова щільність, кг/м3			Статична твердість, Мпа			Вологопоглинання, %			Ціна, грн/м2			Міцність на статичний згин Мпа		
	X_i	$X_{сер}-X_i$	$(X_{сер}-X_i)^2$	X_i	$X_{сер}-X_i$	$(X_{сер}-X_i)^2$	X_i	$X_{сер}-X_i$	$(X_{сер}-X_i)^2$	X_i	$X_{сер}-X_i$	$(X_{сер}-X_i)^2$	X_i	$X_{сер}-X_i$	$(X_{сер}-X_i)^2$
1	3	-0,29	0,08	4	0,43	0,18	1	1,43	2,04	5	-1,86	3,45	4	-0,143	0,0204
2	3	-0,29	0,08	5	-0,57	0,33	5	-2,57	6,61	2	1,14	1,31	2	1,8571	3,449
3	3	-0,29	0,08	5	-0,57	0,33	1	1,43	2,04	2	1,14	1,31	4	-0,143	0,0204
4	1	1,71	2,94	4	0,43	0,18	5	-2,57	6,61	4	-0,86	0,73	5	-1,143	1,3061
5	3	-0,29	0,08	4	0,43	0,18	1	1,43	2,04	2	1,14	1,31	5	-1,143	1,3061
6	3	-0,29	0,08	4	0,43	0,18	1	1,43	2,04	4	-0,86	0,73	2	1,8571	3,449
7	3	-0,29	0,08	5	-0,57	0,33	3	-0,57	0,33	3	0,14	0,02	5	-1,143	1,3061
Середнє значення балу	2,71			4,43			2,43			3,14			3,86		
Середнє квадратичне відхилення			0,33			0,48			2,10			1,14			1,29
Коефіцієнт варіації / 100%			0,12			0,11			0,87			0,36			0,33
		$K_{експ-1}$	0,88		$K_{експ-2}$	0,89		$K_{експ-3}$	0,13		$K_{експ-4}$	0,64		$K_{експ-5}$	0,67
Загальний коефіцієнт погодження експертів	0,64														

За результатами розрахунків (табл. 2.12) коефіцієнт узгодженості експертів знаходиться у межах $0,5 \leq K_{\text{експ}} \leq 1$, тому думка експертів вважається узгодженою. Це дає можливість побудувати матрицю бінарних відношень вагомості показників – табл. 2.13.

Таблиця 2.13

Матриця бінарних відношень

		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	K4	ω_4
		2,71	4,43	2,43	3,14	3,86		
Y1	2,71	=	<	>	<	<	1,82	0,39
Y2	4,43	>	=	>	>	>		
Y3	2,43	<	<	=	<	<		
Y4	3,14	>	<	>	=	<		
Y5	3,86	>	<	>	>	=		

Співвідношення між об'єктами виражені математичними символами "більше" (>), "дорівнює" (=) та "менше" (<).

Визначено, у скільки разів найкращий об'єкт відрізняється від найгіршого, використовуючи формулу (2.1). Далі знаходимо коефіцієнт ω_j , за формулою (2.2). Суміжні члени матриць визначено за формулами (2.3–2.4).

Замінено математичні символи (>), (=) та (<) відповідними значеннями α_{ij} . Після цього створено матрицю суміжності для порівняння показників у табл. 2.14.

Таблиця 2.14

Матриця суміжності для порівняння показників, що характеризують матеріали

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _{i 1}	P _{i 1*}	P _{i 2}	P _{i 2*}
		2,7 1	4,4 3	2,4 3	3,1 4	3,8 6						
X 1	2,7 1	1	0,6 1	1,3 9	0,6 1	0,6 1	1,8 2	0,3 9	4,22	0,17	19,58	0,16
X 2	4,4 3	1,3 9	1	1,3 9	1,3 9	1,3 9			6,56	0,26	32,19	0,27
X 3	2,4 3	0,6 1	0,6 1	1	0,6 1	0,6 1			3,44	0,14	16,59	0,14

X 4	3,1 4	1,3 9	0,6 1	1,3 9	1	0,6 1			5	0,20	23,17	0,19
X 5	3,8 6	1,3 9	0,6 1	1,3 9	1,3 9	1			5,78	0,23	27,38	0,23
Σ									25,00	1,00	118,92	1,00

Розрахунок проведено як і в попередніх подібних таблицях за формулами (2.5 – 2.11).

На основі попередніх результатів побудовано загальну матрицю для обчислення комплексного пріоритету матеріалу (табл. 2.15).

Таблиця 2.15

Підсумкова матриця

Гідрофобізатор	Пріоритет гідрофобізатору по одиничних показниках					Пріоритет показника		Комплексний пріоритет гідрофобізатору
	1	2	3	4	5	номер	значення	
«Праймер ЄС-67»	0,19	0,16	0,32	0,20	0,10	1	0,16	0,179
«OxiDom MineralSurface- 240»	0,26	0,10	0,13	0,22	0,41	2	0,27	0,223
«NANOPHOS SurfaPore W»	0,13	0,16	0,18	0,16	0,07	3	0,14	0,136
«Віртуоз ФМ-11»	0,26	0,28	0,13	0,18	0,26	4	0,19	0,229
«Ceresit CT 13»	0,16	0,28	0,24	0,24	0,16	5	0,23	0,217

З отриманих вище результатів видно, що максимальний пріоритет має гідрофобізатор «Віртуоз ФМ-11» з показником 0,229, тому цей гідрофобізатор рекомендується для використання.

2.3. Рішення багатокритеріальної задачі методом аналізу ієрархій

У процесі вибору найкращого гідрофобізатора, була створена та заповнена матриця парних порівнянь (МПП) (табл. 2.1) критеріїв щодо досягнення поставленої мети (захист деревини від надмірного впливу вологи). Ця процедура базується на особистому аналізі впливу характеристик на досягнення конкретних цілей (табл. 2.16).

Мета: вибір кращого гідрофобізатора

Кількість альтернатив – 5.

Кількість критеріїв – 5.

Таблиця 2.16

Альтернативи та критерії скороченими назвами

№	Критерії	№	Альтернативи
Кр1	Витрата	A1	«Праймер ЄС-67»
Кр2	Мінімальна температура нанесення	A2	«OxiDom MineralSurface-240»
Кр3	Час висихання	A3	«NANOPHOS SurfaPore W»
Кр4	Щільність	A4	«Віртуоз ФМ-11»
Кр5	Ціна	A5	«Ceresit СТ 13»

Розраховано значення середнього геометричного значення елементів матриці за формулою [43]:

$$G_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}) = (a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{is})^{\frac{1}{s}}, \quad (2.17)$$

де i – номер рядка матриці;

s – кількість елементів в s -му рядку матриці;

$a_{i1} = w_1/w_1; a_{i2} = w_2/w_2; \dots; a_{is} = w_s/w_s$.

Далі обчислено значення ЛПр для першого рядка за формулою нижче [43]:

$$ЛПр_1 = \frac{[(w_1/w_1) \cdot (w_2/w_2) \cdot \dots \cdot (w_n/w_n)]^{\frac{1}{s}}}{(G_1 + G_2 + \dots + G_n)}, \quad (2.18)$$

Розрахунок ЛПр для інших рядків виконується аналогічним чином.

Далі проводиться перевірка ступеня однозначності та узгодженості експертних оцінок, тобто чисел у матрицях парних порівнянь. Для здійснення

цього контролю використовуються дві ключові характеристики – індекс узгодженості (CI) і відношення узгодженості (CR), які обчислюються за допомогою формул [43].

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (2.19)$$

$$CR = \frac{CI}{P_n}, \quad (2.20)$$

де n – розмір матриці;

P_n – індекс узгодженості для позитивної зворотної симетричної матриці випадкових оцінок $n \times n$;

λ_{max} – максимальне власне число матриці парних порівнянь або L_{am} обчислюють наступним чином:

1. Обчислюють суму елементів першого рядка матриці.
2. Отриману суму множать на відповідне значення вектора локальних пріоритетів (ЛПр) для першого рядка матриці.
3. Повторюють ці дії для кожного наступного рядка матриці: суму другого рядка множать на ЛПр другого рядка, суму третього рядка – на ЛПр третього рядка і так далі.
4. Усі отримані результати підсумовують.

Отримане значення є найбільшим власним числом матриці попарних порівнянь (МПП), позначеним як λ_{max} або також визначають L_{am} .

За допомогою цього методу розраховано та заповнено табл. 2.17 – 2.22.

Таблиця 2.17

Матриця МПП критеріїв відносно мети

		Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр
Витрата	Кр1	1	1/5	1/3	1/4	1/3	0,354	0,056
Мін.т нанесення	Кр2	5	1	1/4	1/3	1/5	0,608	0,097
Час висихання	Кр3	3	4	1	1/2	1/2	1,246	0,198
Щільність	Кр4	4	3	2	1	1/5	1,369	0,218
Ціна	Кр5	3	5	2	5	1	2,723	0,431
Сумма							6,498	1,000

Показники: N=5; Lam=5,780; CI=0,195; CR=0,174

Найбільше значення ЛПр=0,431

Таблиця 2.18

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію витрати

		Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр
«Праймер ЄС-67»	A1	1	1/2	1/5	1/3	1/4	0,384	0,069
«OxiDom MineralSurface-240»	A2	2	1	2	1/2	1/2	1,000	0,180
«NANOPHOS SurfaPore W»	A3	5	1/2	1	1/2	2	1,201	0,216
«Віртуоз ФМ-11»	A4	3	2	2	1	1/3	1,320	0,238
«Ceresit CT 13»	A5	4	2	1/2	3	1	1,644	0,296
Сумма							5.548	1,000

Показники: N=5; Lam=5,831; CI=0,208; CR=0,185

Найбільше значення ЛПр=0,296

Таблиця 2.19

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію мінімальна температура нанесення

		Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр
«Праймер ЄС-67»	A1	1	1/4	1/2	1/3	1/3	0,425	0,070
«OxiDom MineralSurface-240»	A2	4	1	1/4	1/5	1/2	0,631	0,104
«NANOPHOS SurfaPore W»	A3	2	4	1	1/3	1/4	0,922	0,152
«Віртуоз ФМ-11»	A4	3	5	3	1	1/3	1,719	0,284

«Ceresit CT 13»	A5	3	2	4	3	1	2,35 2	0,389
Сумма							6,04 9	1,000

Показники: N=5; Lam=5,848; CI=0,212; CR=0,189

Найбільше значення ЛПр=0,389

Таблиця 2.20

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію час
висихання**

		Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр
«Праймер ЄС-67»	A1	1	1/2	1/3	1/2	3	0,758	0,139
«OxiDom MineralSurface-240»	A2	2	1	1/3	1/3	1/2	0,644	0,118
«NANOPHOS SurfaPor e W»	A3	3	3	1	1/3	1/2	1,084	0,199
«Віртуоз ФМ-11»	A4	2	3	3	1	2	2,048	0,375
«Ceresit CT 13»	A5	1/3	2	2	1/2	1	0,922	0,169
Сумма							5,457	1,000

Показники: N=5; Lam=5,788; CI=0,197; CR=0,175

Найбільше значення ЛПр=0,375

Таблиця 2.21

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію щільність

		Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр
«Праймер ЄС-67»	A1	1	1/3	1/5	1/2	3	0,631	0,11 2

«OxiDom MineralSurface–240»	A2	3	1	1/3	1/2	1/2	0,758	0,134
«NANOPHOS SurfaPore W»	A3	5	3	1	1/2	3	1,864	0,331
«Віртуоз ФМ-11»	A4	2	2	2	1	2	1,741	0,309
«Ceresit CT 13»	A5	1/3	2	1/3	1/2	1	0,644	0,114
Сумма							5,638	1,000

Показники: $N=5$; $\lambda_m=5,679$; $CI=0,170$; $CR=0,151$

Найбільше значення $LPr=0,331$

Таблиця 2.22

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію ціна

		Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	LPr
«Праймер ЄС–67»	A1	1	1/5	1/3	1/3	1/4	0,354	0,058
«OxiDom MineralSurface–240»	A2	5	1	1/4	1/2	1/3	0,731	0,120
«NANOPHOS SurfaPore W»	A3	3	4	1	1/3	1/2	1,149	0,189
«Віртуоз ФМ-11»	A4	3	2	3	1	1/4	1,351	0,222
«Ceresit CT 13»	A5	4	3	2	4	1	2,491	0,410
Сумма							6,076	1,000

Показники: $N=5$; $\lambda_m=5,731$; $CI=0,183$; $CR=0,163$

Найбільше значення $LPr=0,410$

Побудовано матрицю пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив відносно кожного з критеріїв (табл. 2.23).

Таблиця 2.23

**Матриця пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив
відносно кожного з критеріїв**

	Назва	ПрКр	A1	A2	A3	A4	A5
			«Праймер ЄС-67»	«OxiDom MineralSurface-240»	«NANOPHOS SurfaPore W»	«Віртуоз з ФМ-11»	«Ceresit СТ 13»
Кр 1	Витрата	0,056	0,069	0,180	0,216	0,238	0,296
Кр 2	Мінімальна температура нанесення	0,097	0,070	0,104	0,152	0,284	0,389
Кр 3	Час висихання	0,198	0,139	0,118	0,199	0,375	0,169
Кр 4	Щільність	0,218	0,112	0,134	0,331	0,309	0,114
Кр 5	Ціна	0,431	0,058	0,120	0,189	0,222	0,410

Далі проводиться розрахунок глобального пріоритету (ГлПр). Значення глобального пріоритету для рядка A1 визначається шляхом сумування добутків значень стовпця "ПрКр" (табл. 3.8) на відповідні значення у стовпці "A1". Аналогічні обчислення виконуються для всіх інших рядків.

Отримані дані заносимо у табл. 2.24 глобальні пріоритети альтернатив

Таблиця 2.24

Глобальні пріоритети альтернатив

	Назва	ГлПр
1	«Праймер ЄС-67»	0,088
2	«OxiDom MineralSurface-240»	0,124
3	«NANOPHOS SurfaPore W»	0,220
4	«Віртуоз ФМ-11»	0,278
5	«Ceresit СТ 13»	0,286

З таблиці 3.8 встановлено, що альтернатива A5 «Ceresit СТ 13» має найвищий глобальний пріоритет, який складає 0,286, і, отже, він є найкращою альтернативою для досягнення цілі – захист деревини від впливу вологи

Результати обчислень вказують на вибір гідрофобізаторів для захисту деревини від води: за першим методом максимальний пріоритет набув гідрофобізатор «Віртуоз ФМ-11»; за другим методом максимальний пріоритет

отримав гідрофобізатор «Ceresit СТ 13». Таким чином розрахунки показали які гідрофобізатори слід використовувати в експериментах, щоб визначити який з них буде краще для захисту деревини від води.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОФОБІЗАТОРІВ НА ВОЛОГОСТІЙКІСТЬ ДЕРЕВИНИ

3.1. Матеріали та методика проведення експерименту

Метою експериментальних досліджень було визначення ефективності дії гідрофобізатора на основі силіконових сполук при різних способах його нанесення на соснову деревину. Основна увага приділялася оцінці здатності гідрофобізатора знижувати водопоглинання, запобігати деформаціям і зберігати природний зовнішній вигляд деревини під дією вологи.

У ході роботи було досліджено вплив методу нанесення гідрофобізатора на поведінку деревини при зволоженні, а також проведено порівняльні випробування зразків на водопоглинання та вологопоглинання. Оцінювалися зміни зовнішнього стану та маси після перебування зразків у воді й у вологому середовищі. За результатами досліджень здійснено узагальнення щодо ефективності гідрофобізації як технологічного процесу підвищення вологостійкості деревини.

Для проведення досліджень використовували соснові зразки, без видимих дефектів, тріщин, сучків і смоляних включень. Розміри кожного зразка становили 20×20×30 мм (рис. 3.1), що забезпечувало зручність при проведенні обробки, просушуванні та подальших спостереженнях. Для забезпечення достовірності результатів особливу увагу приділяли одноманітності зразків: усі вони мали однакові розміри, виготовлялися з деревини однієї породи та ділянки заготовки, без видимих дефектів і з близькими значеннями початкової вологості. Це дозволило мінімізувати вплив структурної неоднорідності деревини та пов'язати подальші зміни маси й стану зразків саме з дією вологи та застосованих способів обробки. Перед початком експерименту зразки були висушені до сухого стану, при якому

вологість деревини становила приблизно 12 % що відповідає умовам нормальної експлуатації матеріалів з деревини (рис. 3.1).

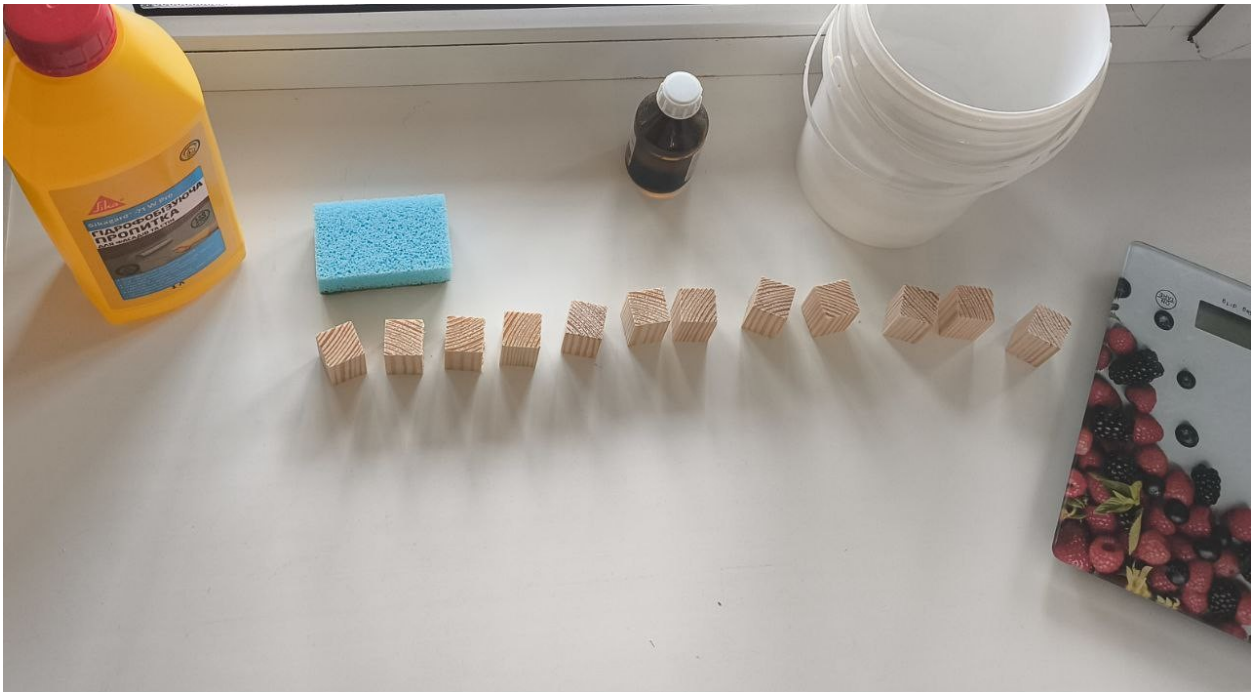


Рис. 3.1. Підготовка зразків та пристосувань для проведення експерименту

Як гідрофобізуючий матеріал використовували гідрофобізатор “Віртуоз ФМ-11”. Для порівняння ефективності обробки було взято олію “Danish oil”, що є модифікованим олійно–лаковим складом на основі висихаючих рослинних олій з додаванням смол та органічних розчинників. Такий продукт поєднує проникну здатність натуральної олії з плівкоутворюючими властивостями лаку, завдяки чому утворює у приповерхневих шарах деревини більш тверде й зносостійке покриття, ніж звичайна олія, зберігаючи при цьому виражену текстуру та природній вигляд деревини.

Дослідження проводили у два основні етапи, які відрізнялися способом нанесення гідрофобізатора (рис. 3.2).

1. Глибинне просочення

Групу зразків деревини повністю занурювали в ємності з гідрофобізатором. Тривалість занурення становила 1 годину для проникнення речовини в капілярну структуру деревини, після чого залишали у горизонтальному положенні до повного висихання за кімнатної температури.

2. Поверхнєве нанесення

Іншу групу зразків обробляли поверхневим нанесенням речовини пензлем. Для рівномірності покриття наносили два шари гідрофобізатора та олії з проміжком у 12 годин між нанесеннями. Такий метод дозволяв перевірити ефективність захисту при частковому проникненні складу в структуру деревини, що є характерним для більшості промислових умов обробки виробів.



Рис. 3.2. Методи нанесення

Перед випробуваннями зразки кондиціонували до досягнення нормованої вологості. Відповідно до ISO 13061–1 малогабаритні зразки, що випробовуються в повітряно-сухому стані, витримують у середовищі з відносною вологістю (65 ± 5) % та температурою (20 ± 2) °C до сталої маси [44]. Для визначення водопоглинання частину зразків занурювали у воду з повним покриттям їхньої поверхні ($\varphi \approx 100$ %), моделюючи умови безпосереднього контакту деревини з водним середовищем (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Контакт зразків з водним середовищем.

Для оцінки вологопоглинання іншу групу зразків витримували темному місці при температурі 5–15°C з підвищеною відносною вологістю повітря ($\varphi \approx 75\%$), імітуючи атмосферні опади, що відтворювало умови тривалої дії вологого середовища. Було застосовано контрольні зразки, що дозволило коректно провести дослідження (рис. 3.4).

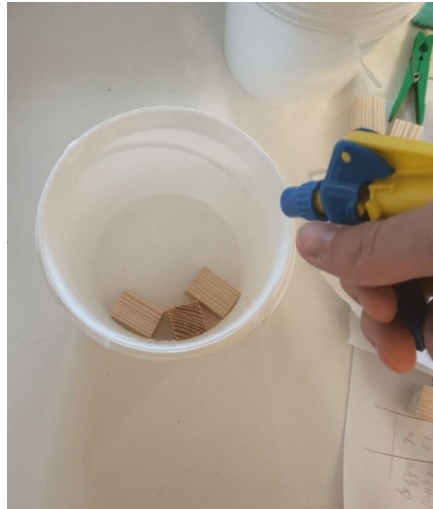


Рис. 3.4. Зразки поміщені в вологе середовище

Здатність гідрофобізованої деревини до поглинання води визначають, як масову частку води, що поглинається, W , у відсотках за формулою:

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

де m_1 – маса зразка до поглинання води, г;

m_2 – маса зразка після поглинання, г.

Оброблена деревина забезпечує гігроскопічність, якщо поглинання води не перевищує 30 % [50].

Під час експерименту для кожного зразка фіксували зміну маси, яку визначали шляхом зважування на лабораторних вагах із точністю 0,1 г для оцінки ступеня водопоглинання. Усі дані заносили до експериментального журналу з подальшим узагальненням результатів для побудови порівняльних таблиць.

3.2. Дослідження впливу методу нанесення гідрофобізатора на показники водопоглинання деревини

Основну увагу зосереджено на порівнянні ефективності двох методів обробки синтетичним гідрофобізатором “Віртуоз ФМ-11” – глибинного просочення (методом занурення) та поверхневого нанесення, у зіставленні з традиційною обробкою олією “Danish oil” та контрольною групою зразків. Дослідження динаміки зміни маси зразків в умовах прямого контакту з водним середовищем дозволило оцінити надійність сформованих гідрофобних бар’єрів та визначити залежність водостійкості деревини від глибини проникнення захисного агента в її капілярну структуру (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Водопоглинання зразків деревини

Витримка	2год.	4год.	12год.	24го д	48год	Зниження, %
Гідрофобізатор покриття методом занурення, %	0,0	0,0	2,5	3,9	5,5	62,5
Гідрофобізатор покриття методом нанесення, %	0,0	1,2	1,6	4,5	7,5	60,5
Олія “ Danish oil”%	5,0	12,0	20,0	27,0	38,0	30
Контрольний зразок, %	33,0	46,0	53,0	59,0	68,0	–

Зразки соснової деревини, просочені гідрофобізатором методом занурення, продемонстрували найкращу стійкість до дії води. Уже на 2–й та 4–й годинах випробування приріст маси був практично відсутній, тобто водопоглинання залишалося на рівні 0 %. Вода утримувалася на поверхні у вигляді окремих крапель і повільно стікала, не проникаючи в глибину капілярної структури. Поверхня зберігала однорідний вигляд, без потемніння, матування чи ознак набухання, що свідчить про формування глибокого гідрофобного бар’єру в товщі деревини. Після 48 годин занурення кінцеве

водопоглинання для цієї групи зразків становило лише 5,5 %, що підтверджує високий рівень захисту.

Для зразків із поверхневим нанесенням гідрофобізатора було зафіксовано дещо вищі значення водопоглинання порівняно з методом занурення, але суттєво нижчі, ніж у контролю. На 2-й годині приріст маси був відсутній, а на 4-й годині становив лише 1,2 %. Вода також утримувалася на поверхні у вигляді крапель, однак частково проникала в приповерхневі шари деревини. На поверхні спостерігався слабкий блиск без видимих ознак потемніння чи пошкоджень. Це свідчить, що поверхнєве нанесення забезпечує ефективний, але менш глибокий захист, а отже – нижчу водостійкість порівняно з просоченням методом занурення. Після 48 годин занурення кінцеве водопоглинання цих зразків становило 7,5 %, що все ще у багато разів менше порівняно з контролем.

Просочені зразки, продемонстрували проміжні характеристики між гідрофобізованими та контрольними. Вода частково затримувалась на поверхні, однак поступово проникала в пори деревини. Зовнішній вигляд зразків залишався задовільним: істотного потемніння не спостерігалось, однак при подальшому витримуванні у воді відзначалося зростання водопоглинання. Після 48 годин випробувань кінцеве водопоглинання для цієї групи досягало 38 %, що свідчить лише про частковий гідрофобний ефект і обмежену здатність олії протидіяти тривалій дії водного середовища.

Контрольні, необроблені зразки характеризувалися найвищою інтенсивністю водопоглинання. Вода проникала в капілярно-пористу структуру деревини. Після 48 годин занурення кінцеве водопоглинання контрольних зразків становило 68 %, що є максимальним значенням серед усіх досліджених варіантів.

Для наочного зображення результатів було побудовано стовпчикову діаграму, яка відображає зміну водопоглинання зразків деревини залежно від тривалості їх занурення у воду. Діаграма дозволяє легко порівняти ефективність різних способів обробки – нанесення гідрофобізатора,

просочення методом занурення, обробки олією та контрольного зразка без покриття – і демонструє перевагу гідрофобізатора, особливо при глибокому просоченні, у зменшенні водопоглинання деревини (рис. 3.5).

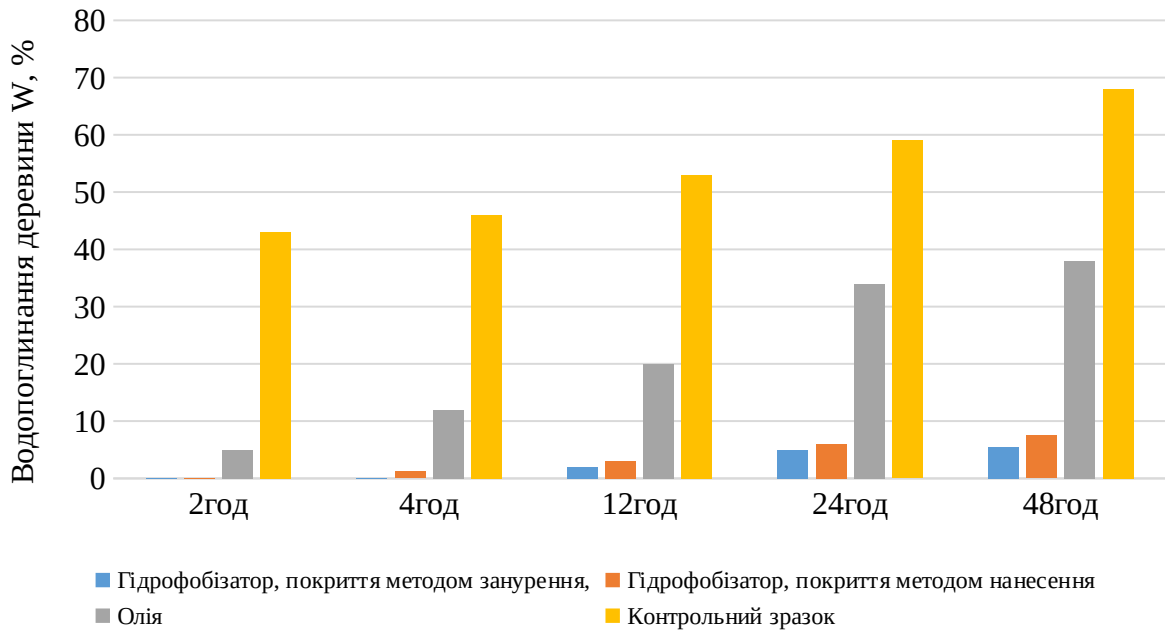


Рис. 3.5. Стопхикова діаграма, водопоглинання зразків деревини

Графічне зображення експерименту (рис. 3.6) відображає градацію рівня водопоглинання зразків деревини залежно від способу обробки та тривалості занурення. Графік дозволяє простежити, як змінюється інтенсивність насичення водою – від мінімальних значень у зразків, просочених гідрофобізатором, до максимальних у контрольних зразках.

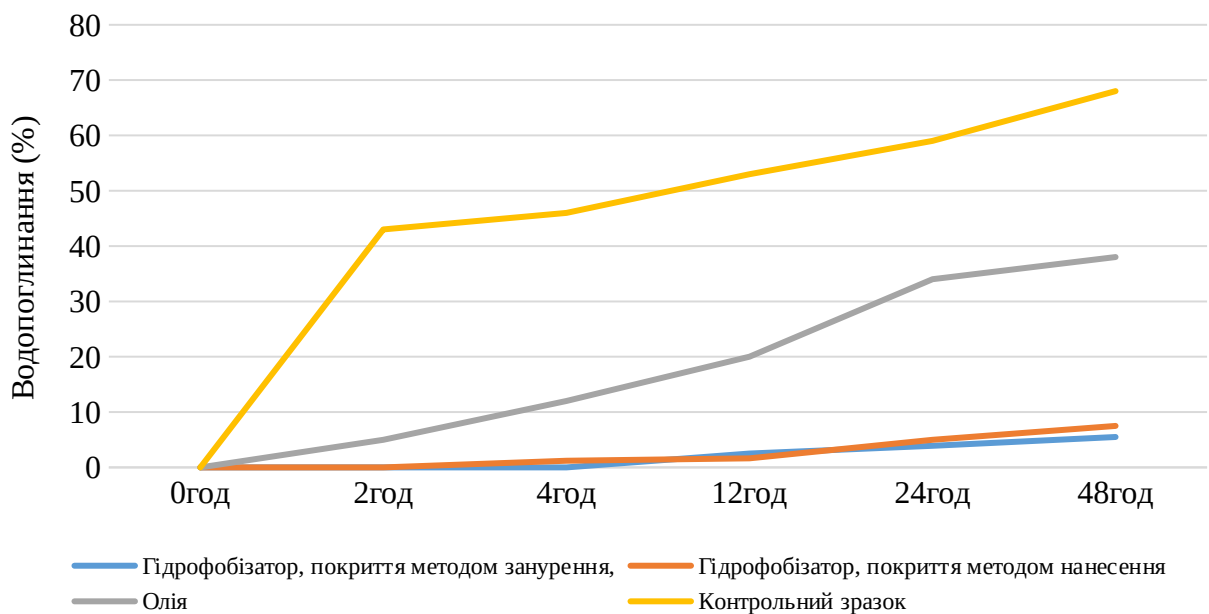


Рис. 3.6. Графічне зображення експерименту, водопоглинання зразків

Таким чином, результати експериментальних досліджень показали, що найкращі властивості виявлено у зразків, просочених гідрофобізатором методом занурення. Цей спосіб забезпечує рівномірне проникнення складу у волокнисту структуру деревини, утворюючи захисний бар'єр. Поверхнєве нанесення, хоча і менш ефективно, може бути використане у випадках, коли глибинне просочення економічно недоцільне. На тлі інтенсивного зволоження спостерігалось також збільшення об'єму контрольного зразка приблизно на 10 %, що вказує на виражене набухання і підвищений ризик деформацій та погіршення експлуатаційних властивостей деревини.

3.3. Дослідження впливу методу нанесення гідрофобізатора на показники водопоглинання деревини

Дослідження спрямоване на оцінку бар'єрних властивостей гідрофобізатора “Віртуоз ФМ-11” при різних методах нанесення – глибинному просоченні та поверхневій обробці, у порівнянні з методом олією “Danish oil”. Ключовим завданням цього етапу було визначення здатності захисних покриттів стабілізувати вологість деревини при тривалій експозиції (31 доба) та запобігати досягненню критичної точки насичення волокон, що є визначальним фактором біологічної стійкості та геометричної стабільності конструкцій в умовах атмосферної експлуатації.»

Аналіз отриманих експериментальних даних дозволяє вибудувати чітку ієрархію ефективності досліджуваних методів (табл. 3.2).

Зразки з глибинним нанесенням гідрофобізатору продемонстрували найкращий результат. Кінцеве вологопоглинання зразків на 31-шу добу склало 18 %, що на 14 % нижче порівняно з контрольного зразка (32 %). Це свідчить про формування бар'єра, який ефективно блокує дифузію водяної пари вглиб структури деревини, утримуючи вологість на безпечному рівні.

Таблиця 3.2

Вологопоглинання зразків деревини

Тривалість, дні	1	4	7	10	14	17	21	24	28	31	Зниження, %
Покриття методом занурення, %	5	14	16	17	17	17	17	17	17	18	14
Покриття методом нанесення, %	6	16	19	20	21	21	21	21	21	22	10
Олія “ Danish oil“%	8	18	20	22	23	24	25	25	26	26	6
Контрольний зразок, %	9	20	23	24	25	27	28	30	30	32	–

При нанесенні засобу пензлем кінцеве вологопоглинання зафіксовано на рівні 22 %. Ефективність захисту склала 10 % відносно контролю. Хоча цей показник поступається методу занурення, він все ж забезпечує суттєвий захисний ефект, утримуючи вологість деревини на межі експлуатаційної норми для зовнішніх конструкцій.

Використання олії показало найменшу ефективність. Кінцеве вологопоглинання зразків сягнуло 26 %, що на 6 % відрізняється від незахищеної деревини (рис. 3.7). Це вказує, що плівкоутворюючі властивості олійно-лакової суміші є недостатніми для довготривалого стримування сорбції вологи з повітря, і матеріал залишається вразливим до набухання.

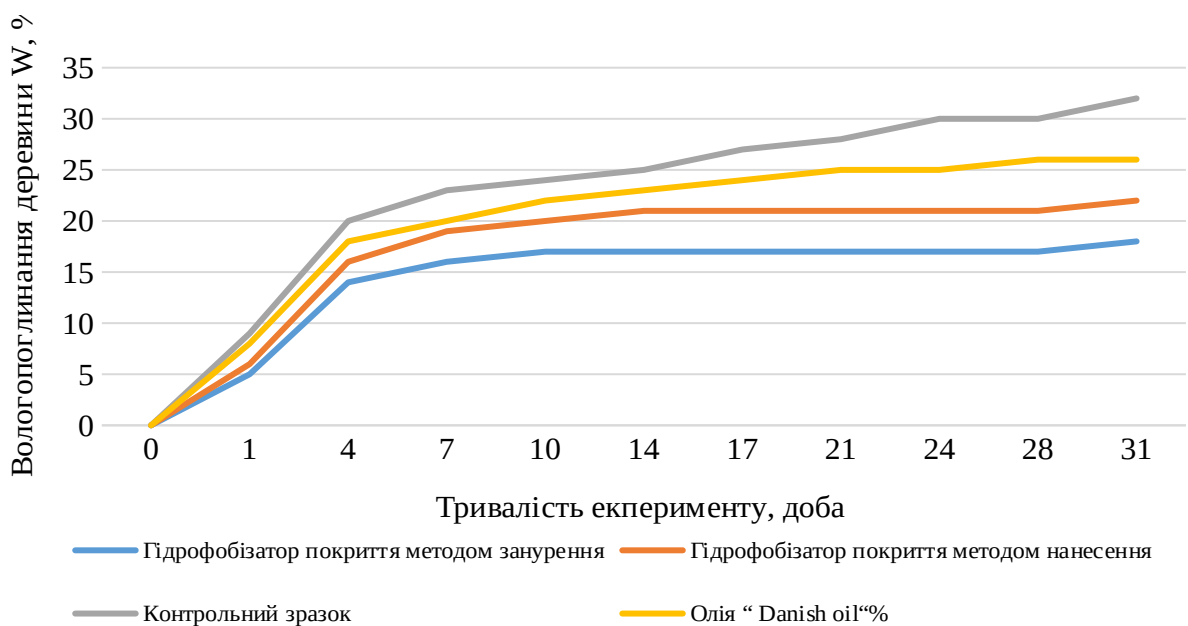


Рис. 3.7. Графічне зображення експерименту, вологопоглинання зразків

Графічне зображення результатів добре відображає вплив гідрофобізатора. Отримані результати свідчать про збереження паропроникності сформованих гідрофобних покриттів. Незважаючи на істотне зниження вологопоглинання у зразків, оброблених гідрофобізатором, спостерігається певне зростання вологості в часі, що означає відсутність суцільного герметичного бар'єра гідрофобні шари ефективно обмежують проникнення рідкої води та знижують рівноважну вологість деревини, водночас зберігаючи можливість дифузії водяної пари крізь порову структуру матеріалу (рис. 3.8).

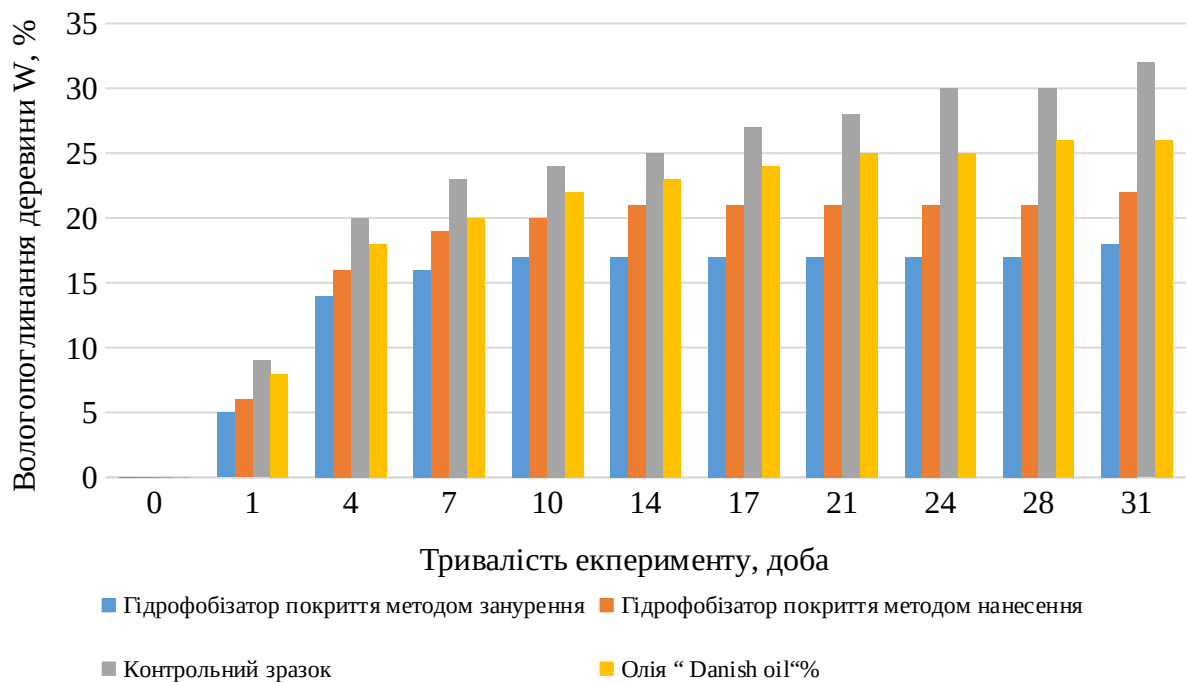


Рис. 3.8. Стовпчикова діаграма, вологопоглинання зразків деревини

Порівняльний аналіз свідчить, що при нанесенні гідрофобізатора методом занурення захист деревини є найбільш ефективним з погляду зниження водо- та вологопоглинання, оскільки забезпечується глибоке просочення порової структури та формування стійкого гідрофобного бар'єру. Водночас такий спосіб супроводжується підвищеними витратами захисної речовини та ускладненням технологічного процесу.

РОЗДІЛ 4

АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОФОБІЗАТОРІВ

4.1. Обґрунтування технологічної доцільності вибору методу нанесення гідрофобізатора

Згідно з отриманими експериментальними даними, поверхнєве нанесення гідрофобізатора “Віртуоз ФМ-11” продемонструвало високу ефективність, забезпечивши зниження вологопоглинання на 22 % у співвідношенні до контрольного зразка в умовах агресивного вологого середовища. Незважаючи на математичну перевагу методу занурення, для прийняття технологічного рішення необхідно керуватися не лише максимальним ефектом, а й принципом експлуатаційної достатності.

Ризик біологічного руйнування виникає тоді, коли вологість деревини перевищує критичний поріг у 30 % і утримується на цьому рівні тривалий час. У експерименті саме контрольний зразок перетнув цю небезпечну межу, досягнувши критичного насичення. Натомість зразки з поверхневою обробкою продемонстрували суттєвий опір зволоженню, не дозволивши матеріалу набрати критичну масу води за той самий проміжок часу.

Враховуючи, що в реальних умовах експлуатації деревина не перебуває у воді постійно, як в умовах нашого лабораторного експерименту, а піддається лише циклічному зволоженню дощем із подальшим висиханням та провітрюванням, досягнутий показник зниження водопоглинання є цілком достатнім для гарантування захисту.

Захисний бар'єр створений поверхневим методом нанесення ефективно справляється не дозволяючи деревині досягти точки насичення волокон, що робить використання більш дорогівартісного та складного методу занурення технологічно надлишковим для більшості зовнішніх конструкцій (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Порівняння методу нанесення гідрофобізатору

Характеристика процесу	Метод глибинного просочення (Занурення)	Метод поверхневого нанесення
Обладнання	Вимагає спеціалізованих ванн, підйомних механізмів, систем зливу та фільтрації розчину.	Використовується стандартне фарбувальне обладнання або ручний інструмент.
Гнучкість	Обмежена розмірами ванни. Неможливо обробляти змонтовані або великогабаритні конструкції.	Можлива обробка виробів будь-якої конфігурації, у тому числі на об'єкті.
Підготовка поверхні	Вимагає ідеальної чистоти деталей, щоб не забруднити розчин у ванні тирсою.	Менш критична до дрібного пилу, оскільки інструмент не контактує із загальним об'ємом рідини.
Швидкість процесу	Повільна (мінімум 1 година занурення + стікання+сушіння).	Висока (нанесення займає хвилини + час на висихання).

Табл. 4.1 демонструє порівняння двох технологічних підходів до нанесення гідрофобізатора – методу глибинного просочення (занурення) та методу поверхневого нанесення – за ключовими виробничими параметрами.

4.2. Порівняння характеристик гідрофобізатора “Віртуоз ФМ-11” та олії “Danish Oil”

Для комплексної оцінки захисних властивостей досліджуваних систем було проведено порівняння їх фізико-механічних показників. Узагальнені дані щодо відмінностей між олією “Danish Oil” та гідрофобізатором “Віртуоз ФМ-11” наведено у табл. 4.2.

Аналіз свідчить, що головна відмінність полягає у механізмі дії. Олія створює бар’єрну плівку, забезпечуючи лише середнє зниження водопоглинання та тимчасовий ефект краплеутворення, натомість гідрофобізатор формує наночар, гарантуючи високу стійкість до вологи та стабільний гідрофобний ефект.

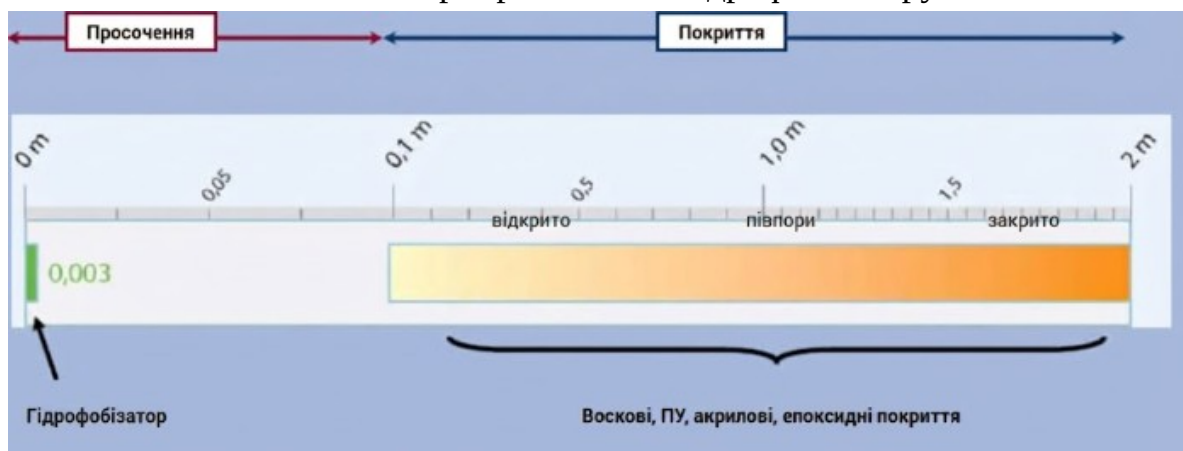
Порівняння фізико-механічних показників захисних систем

Параметр	Олія Danish Oil	Гідрофобізатор Віртуоз ФМ-11
Механізм водовідштовхування	Бар'єрна плівка + Заповнення пор	Нано шар
Ефект Краплеутворення	Помірний, зникає з часом	Виражений, стабільний
Зниження водопоглинання	Середнє (сповільнення)	Високе
Глибина проникнення	Поверхнева	Поверхнева

Здатність деревини пропускати вологу характеризується паропроникністю, яке характеризується значенням S_d (еквівалентна товщина шару повітря). Чим нижче значення, тим вища паропроникність.

Оскільки гідрофобізатор не утворює суцільної плівки, а лише модифікує поверхню пор, газообмін практично не порушується [51, 52]. Значення S_d зазвичай становить 0.02–0.05 м. Це дозволяє волозі, яка потрапила в деревину, вільно випаровуватися, запобігаючи внутрішньому загниванню (рис. 4.1).

Рис. 4.1. Паропроникність гідрофобізатору



Олійні покриття займають проміжну позицію. Вони більш проникні, ніж синтетичні лаки (поліуретани, епоксиди). Полімеризована олія та смоли

частково перекривають пори. Значення S_d для олій варіюється в діапазоні 0.2–0.9 м залежно від кількості нанесених шарів.

Спираючись на отримані порівняльні дані, розглянемо доцільність використання досліджуваних засобів залежно від умов експлуатації та функціонального призначення виробів. В інтер'єрі пріоритетними є естетичний вигляд деревини, тактильні відчуття та стійкість до побутових забруднювачів.

Олія “Danish Oil” – це передусім естетично-захисний засіб, що діє за механізмом фізичного блокування пор та поверхневої полімеризації. Його сильні сторони – візуальна привабливість, зміцнення поверхні. Слабкі сторони – низька стійкість до УФ, помірна гідрофобність. Використання олії є доцільним в умовах помірної вологи де вплив вологи не є критичним.

Наприклад, кухонна шафа із масиву деревини піддається помірному впливу вологості, що виникає під час готування їжі чи миття посуду (рис. 4.2). У таких умовах деревина зазнає короточасних коливань вологості та температури, однак ці зміни зазвичай не перевищують меж, що можуть спричинити значні деформації чи пошкодження. Саме тому застосування олійних покриттів у таких зонах є цілком виправданим, оскільки вони зменшують водопоглинання та покращують стабільність розмірів.



Рис. 4.2. Кухонна шафа в умовах експлуатації

Садові меблі розташовані під навісом (рис. 4.3), піддаються помірному впливу атмосферної вологості та короточасним змінам температури, але не зазнають прямого намокання. У таких умовах деревина реагує незначним набуханням і усушкою, що не призводить до суттєвих деформацій. Тому використання олійних покриттів для садових меблів під захистом є доцільним, оскільки вони зменшують водопоглинання та підвищують стабільність у мінливому зовнішньому середовищі.



Рис. 4.3. Комплект садових меблів з масиву

Гідрофобізатор “Віртуоз ФМ-11” – це функціонально-захисний агент, що діє на молекулярному рівні, змінюючи поверхню матеріалу, надаючи їй виражені водовідштовхувальні властивості без порушення природної паропроникності деревини. Приміром, у дерев’яних альтанках така обробка дозволяє ефективно протидіяти атмосферним опадам (рис. 4.4). Вода не проникає в структуру деревини, а стікає у вигляді крапель, мінімізуючи ризик набухання, короблення та утворення мікротріщин. Це особливо важливо для конструкцій, що працюють у режимі регулярного змочування та висихання, адже зниження гігроскопічності матеріалу сприяє збереженню геометричної стабільності елементів, подовженню строку їх служби. Оброблені гідрофобізатором несучі та декоративні частини альтанки довше зберігають свій зовнішній вигляд, стійкість до вологих циклів і менше піддаються біологічному ураженню.



Рис. 4.4. Дерев'яна альтанка

Вхідні дерев'яні двері (рис. 4.5) постійно перебувають під впливом атмосферної вологи та коливань температури, що спричиняє їхнє набухання, деформації та погіршення роботи дверного полотна. Обробка гідрофобізатором у таких конструкціях формує на поверхні та в приповерхневих шарах деревини стійкий водовідштовхувальний нано-шар, який перешкоджає капілярному поглинанню вологи та забезпечує стабільність геометричних розмірів. Завдяки цьому двері зберігають функціональність навіть за умов підвищеної вологості.



Рис. 4.5. Вхідні дерев'яні двері

Отже, на підставі отриманих результатів дослідження обґрунтовано доцільність використання поверхневого методу нанесення гідрофобізатора, який забезпечує експлуатаційно достатній рівень захисту, утримуючи вологість деревини нижче критичного порогу біологічного руйнування та не потребуючи застосування складного обладнання для занурення. Такий підхід базується на ефективній модифікації поверхневих пор і зниженні змочуваності деревини, що суттєво перевищує захисну дію олійних просочень, механізм яких забезпечує лише помірний бар'єрний ефект.

Визначено, що ключовою конкурентною перевагою гідрофобізатора є збереження високої паропроникності матеріалу, що дозволяє конструкціям “дихати” та мінімізує ризики внутрішнього гниття. Це чітко розмежовує сфери застосування досліджуваних матеріалів. Гідрофобізатори є вибором для більш жорстких умов експлуатації зовнішніх конструкцій. Олійні покриття слід використовувати в більш помірних умовах зволоження, де деревина не зазнає тривалого контакту з водою.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було проаналізовано актуальне науково-практичне завдання підвищення довговічності та експлуатаційної надійності дерев'яних конструкцій шляхом впровадження технології гідрофобізації. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

Встановлено, що традиційні плівкоутворюючі покриття (лаки, фарби) та натуральні просочення (олії) мають суттєві експлуатаційні обмеження, зокрема блокування паропроникності деревини або втрату захисних властивостей під тривалою дією вологого середовища. Обґрунтовано, що найбільш перспективним напрямком захисту з збереженням паропроникності є використання гідрофобізаторів які реалізують механізм молекулярної модифікації поверхні. Це дозволяє зберегти пори деревини відкритими, запобігаючи внутрішньому заправанню та забезпечити стабільний водовідштовхувальний ефект без зміни зовнішнього вигляду матеріалу.

На основі аналізу ринку та застосування методу аналізу ієрархій визначено, що оптимальним засобом для дослідження є гідрофобізатор "Віртуоз ФМ-11". Засіб продемонстрував найкращий баланс між технічними характеристиками та економічною доступністю порівняно з аналогами.

Експериментально доведено перевагу синтетичних гідрофобізаторів над модифікованими оліями "Danish Oil". Під час випробувань на водопоглинання встановлено, що обробка Danish Oil забезпечила зменшення поглинання води приблизно на 30 % у порівнянні з контрольним зразком. Значно кращий результат показало поверхнєве нанесення гідрофобізатора, яке знизило водопоглинання приблизно на 60,5 %, тоді як метод занурення забезпечив максимальний ефект – зменшення на 62,5 % відносно контрольного зразка. Можна стверджувати що гідрофобізатор дає істотну перевагу над олійними складами у формуванні водовідштовхувального бар'єра.

Під час дослідження вологопоглинання встановлено, що Danish Oil зменшив кінцеве насичення вологою приблизно на 6 % порівняно з

контрольним зразком. Поверхнєве нанесення гідрофобізатора забезпечило зниження вологопоглинання на 10 %, тоді як метод занурення продемонстрував найвищу ефективність – зменшення на 14 % у порівнянні з контрольним зразком. Таким чином, гідрофобізатор, незалежно від способу нанесення, підвищує вологостійкість деревини, паропроникність сформованих гідрофобних покриттів зберігається.

Хоча метод занурення дає й кращі показники, для захисту більшості зовнішніх конструкцій, технологічно та економічно доцільним є метод поверхневого нанесення. Досягнутий цим методом рівень водо- та вологопоглинання є достатнім для запобігання розвитку грибків в реальних умовах експлуатації. Метод дозволяє суттєво знизити витрати на обладнання та матеріали, зберігаючи при цьому високу захисну здатність та естетичну автентичність деревини, що робить його оптимальним рішенням для сучасного деревообробного виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Якої вологості має бути деревина. *baza-drov.com.ua*: веб-сайт. URL: <https://baza-drov.com.ua/uk/blog/korisne/yakoji-vologosti-maje-but-i-derevina> (дата звернення 24.07.2025).
2. Як вологість впливає на властивості деревини: *stograd.rv.ua* : веб-сайт. URL: <https://stograd.rv.ua/blog/?%D0%AF%D0%BA%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C%D0%B2%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%94%D0%B2%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B8> (дата звернення 24.07.2025).
3. Склад деревини та її біологічні властивості. *Bionic house* : веб-сайт. URL: <https://bionic-house.com.ua/ua/articles/32-sklad-derevini-ta-jiji-biologichni-vlastivosti.html> (дата звернення 24.07.2025).
4. Деревина та інші матеріали, що застосовуються в столярній справі. Ваді деревини. *stograd.rv.ua* : веб-сайт. URL: <https://studfile.net/preview/10401031/> (дата звернення 24.07.2025).
5. Проблеми при проектуванні та виробництві сучасних фасадів. *stonechem.ua* : веб-сайт. URL: <https://stonechem.ua/blogs/problemi-pri-proektuvanni-ta-virobnictvi-sucasnix-fasadiv-pricini-naslidki-ta-risennia> (дата звернення 24.07.2025).
6. Властивості пиломатеріалів листяних і хвойних порід: *sosna.ua* : веб-сайт. URL: <https://sosna.ua/pilomateriali/vlastivosti-listjanih-i-hvojnih-porid/> (дата звернення 24.07.2025).
7. Хвойні: *wikipedia.org* : веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D1%96> (дата звернення 24.11.2025).

8. Терасна дошка з сибірської модрини. *au-mex* : веб-сайт. URL: <https://www.au-mex.com/wood-decking/coniferous-and-thermo-wood/siberian-larch> (дата звернення 24.07.2025).
9. Ісаєнко Д. Б. Деревинознавство з основами лісового товарознавства і стандартизації лісової продукції : навч. посібник. Біла Церква, 2023. 112 с.
10. Властивості різних порід пиломатеріалів. *studfile.net* : веб-сайт. URL: <https://studfile.net/preview/12610936/> (дата звернення 24.07.2025).
11. Яка має бути вологість будівельної деревини. *Foreest.com.ua* : веб-сайт. URL: <https://foreest.com.ua/uk/yaka-maye-butyu-vologist-budivelnoyi-derevynu/> (дата звернення 11.08.2025).
12. Властивості деревини. Вибір матеріалу для виробу *Disted.edu.vn.ua* : веб-сайт. URL: <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/9022> (дата звернення 24.11.2025).
13. Камерне сушіння (сушіння в печі). *vesely.at* : веб-сайт. URL: <http://www.vesely.at/en/sales/blue-stain-protection/chamber-drying.html> (дата звернення 11.08.2025).
14. Конвективні сушильні камери для пиломатеріалів. *kogpa.edu.ua*: веб-сайт. URL: https://kogpa.edu.ua/images/main_dir/nauka/rez_spivpraz/drogob/13%20Posibnyk%20Tehnolohia%20derevoobrobnoho%20remesla.pdf (дата звернення 11.08.2025).
15. Ялина або сосна – вибір оптимального варіанта для будівництва будинку. *malka.kiev* : веб-сайт. URL: <https://malka.kiev.ua/uk/stati/el-ili-sosna/> (дата звернення 11.08.2025).
16. Як правильно обрати покриття для захисту деревини. *Shlifarb* : веб-сайт. URL: <https://shlifarb.com.ua/ua/sovety-i-rekomendatsii/kak-pravilno-vybrat-pokrytie-dlya-zashchity-drevesiny/> (дата звернення 11.08.2025).

17. Nitrocellulose coatings. *Indiamart* : веб-сайт. URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/nitrocellulose-coatings-19131122155.html> (дата звернення 22.08.2025).

18. Лакофарбове покриття. *rubankom.com* : веб-сайт. URL: <https://rubankom.com/sooruzheniya/chasti-zdaniya/perekrytiya/982-derevyannye-perekrytiya> (дата звернення 22.08.2025).

19. Технічні вимоги до захисного лакофарбового покриття об'єктів підземних сховищ газу. *utg.ua*: веб-сайт. URL: <https://utg.ua/img/menu/company/docs/2023/04/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D1%96%20%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B3%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%20%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%B8%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D1%84%D0%B0%D1%80%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%82%D1%82%D1%8F%20%D0%BE%D0%B1%D1%94%D0%BA%D1%82%D1%96%D0%B2%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D1%85%20%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%89%20%D1%85%D0%B0%D0%B7%D1%83.pdf> (дата звернення 22.08.2025).

20. Антисептики для деревини. *vidaron-ua.com* : веб-сайт. URL: <https://vidaron-ua.com/antyseptyky-dlia-derevyny/> (дата звернення 24.11.2025).

21. FladpenseL Natur: веб-сайт. *decor-farver.dk*: URL: <https://decor-farver.dk/en/brushes/fladpenseL-natur-.html> (дата звернення 22.08.2025).

22. Все про ґрунтовку. *grico.com.ua* : види, призначення та особливості використання: веб-сайт. URL: <https://grico.com.ua/statti-ta-poradi/vse-pro-runtovku-vidi-priznachennya-ta-osoblivosti-vikoristannya/> (дата звернення 22.08.2025).

23. Порозаповнювач. *aura.if.ua* : веб-сайт. URL: <https://aura.if.ua/ua/lakofarbovi-materiali/laki-i-masla/porozapolnitel/> (дата звернення 22.08.2025).

24. Шпаклівка для дерева: характеристики і застосування. *oxidom.com* : веб-сайт. URL: <https://oxidom.com/ua/shpaklivka-dlia-dereva-kharakterystyky-i-zastosuvannia/> (дата звернення 22.08.2025).

25. Покриття деревини олією. *belinka.com* : веб-сайт. URL: <https://www.belinka.com/ua/nasvetiua/pokrittya-derevini-oliyeyu/> (дата звернення 04.09.2025).

26. Вологість деревини для будівництва: якою вона має бути. *pl2t.com* : веб-сайт. URL: <https://pl2t.com/uk/blog/post/vologist-derevini-dla-budivnictva-akou-vona-mae-buti/> (дата звернення 04.09.2025).

27. Якісні показники деревних матеріалів. *stud.com.ua* : веб-сайт. URL: https://stud.com.ua/74744/tehnika/yakisni_pokazniki_derevnih_materialiv (дата звернення 04.09.2025).

28. Вироби і конструкції з деревини. *erpub.chnpu.edu.ua* : веб-сайт. URL: <http://erpub.chnpu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/5547/1/%D0%92%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%B8%20%D1%96%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%97%20%D0%B7%20%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B8.pdf> (дата звернення 04.09.2025).

29. Електронна бібліотека ЛНТУ. *elib.lntu.edu.ua* : веб-сайт. URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%95%D0%9D%D0%9F%20%D1%88%D0%BC%D0%B0%D0%BB%D1%8C%20%D0%BE%20%D1%84/page29.html (дата звернення 04.09.2025).

30. Legno di recupero. *subito.it* : веб-сайт. URL: <https://www.subito.it/giardino-fai-da-te/legno-di-recupero-macerata-559406712.htm> (дата звернення 04.09.2025).

31. Вологість деревини: в чому полягає її важливість. *jordprotect.pl*: веб-сайт. URL: <https://njordprotect.pl/ua/%D0%B2%D0%BE%D0%BB>

%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C–
%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B8–
%D0%B2–%D1%87%D0%BE%D0%BC%D1%83–%D0%BF%D0%BE
%D0%BB%D1%8F%D0%B3%D0%B0%D1%94–%D1%97/ (дата звернення
04.09.2025).

32. Гідрофобізатор для дерева. *24.com.ua* : веб-сайт. URL:
https://m24.com.ua/gidrofobizator_dlya_dereva (дата звернення 15.09.2025).

33. Навіщо потрібен гідрофобізатор для дерева. *Hydrophobneo.blog* :
веб-сайт. URL: <https://hydrophobneo.blog/zachem-nuzhen-gidrofobizator-dlya-dereva/> (дата звернення 15.09.2025).

34. Гідрофобізатор для дерева *Primer.com.ua* : веб-сайт. URL:
https://primer.com.ua/ru/gidrofobizator_dlya_dereva (дата звернення 15.09.2025).

35. Гідрофобізатор Oxidom MineralSurface-240. *Oxidom.com* : веб-
сайт. URL: <https://oxidom.com/ua/hidrofobizator-oxidom-mineralsurface-240-05-1-bezbarvnyi/> (дата звернення 15.09.2025).

36. Гідрофобізатор та його призначення. *Sanitary.ua* : веб-сайт. URL:
<https://uabeton.com.ua/product/sanitary-prozoryy/?srsrtid=AfmBOooWUzueLTlafFZArAMNVv1cueo9voIC75Imgnduq3WGYMYgPE05> (дата звернення 15.09.2025).

37. Гідрофобізатор Virtuoz FM-11. *dobavki.com.ua* : веб-сайт. URL:
<https://virtuoz-dobavki.com.ua/gidrofobizator-virtuoz-fm-11> (дата звернення
15.09.2025).

38. Гідрофобізатори для дерева в Україні. *Prom.ua* : веб-сайт. URL:
<https://prom.ua/ua/Gidrofobizatory-dlya-dereva.html> (дата звернення
15.09.2025).

39. Гідрофобізатор Ceresit СТ 13. *Ceresit.ua* : веб-сайт. URL:
https://www.ceresit.ua/catalog/gidroizolicija/zasoby-dlja-hidrofobizaciji/produkti.html/ceresit-ct-13/SAP_0201WTC014E3.html (дата звернення
23.09.2025).

40. Freepik. *freepik.com* : веб-сайт. URL: <https://freepik.com/free-photos-vectors/дуб-текстура> (дата звернення 23.09.2025).
41. Якісні параметри деревинних матеріалів. *Iteh.ai* : веб-сайт. URL: <https://universaltool.com.ua/ua/p2498211519-gidrofobizator-oxidom-mineralsurface.html> (дата звернення 23.09.2025).
42. Вологість деревини: як виміряти та визначити. *woodexpert.net.ua* : веб-сайт. URL: <https://woodexpert.net.ua/vologist-derevyny-yak-vymiryaty-ta-vyznachyty-sposoby-sushinnya-derev-riznyh-porid-vydy-vologosti-formuly-vlastyvoli/> (дата звернення 23.09.2025).
43. Пінчевська О. О., Головач В. М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни: «Інноваційні технології з оброблення деревини». Київ : НУБіП України, 2021. 62 с. (дата звернення 23.09.2025).
44. Як правильно зберігати пиломатеріали: практичні поради. *Woodmax.ua* : веб-сайт. URL: <https://woodmax.ua/yak-pravylno-zberihaty-pyломaterialy-praktychni-porady/> (дата звернення 23.09.2025).
45. Гідрофобізатори: призначення, характеристики і сфера застосування. *Nanomarket* : веб-сайт. URL: https://nanomarket.ua/gidrofobizator-dlya-derevini-nanophos-surfapore-w/?srsltid=AfmBOopFr50DR_KTrYo_8nyJnrDH2be3qiOuTNLUCC4m45x2VdJdf6AM (дата звернення 23.09.2025).
46. Stöd R., Marttila J., Tomppo L., Naapala A., Verkasalo E. 567 Modulus of Elasticity and Bending Strength of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood from Commercial Thinnings. *Forests*, 2024. Vol. 15. p. 13.
47. ISO 3129:2012 Wood – Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. (дата звернення 23.09.2025).
48. ISO 13061–1:2014 Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear specimens – Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. (дата звернення 23.09.2025).
49. Гідрофобізатори: призначення, характеристики і сфера застосування. *Oxidom.com* : веб-сайт. URL:

<https://oxidom.com/ua/hidrofobizatory-pryznachennia-kharakterystyky-i-sfera-zastosuvannia/> (дата звернення 23.09.2025).

50. Властивості деревини. *Bdyld.osv.org.ua* : веб-сайт. URL: <https://bdyld.osv.org.ua/news/16-40-31-27-09-2022/> (дата звернення 23.09.2025).

51. Turan M., Yeniocak M., Saltik B., Goktas O., Alma M.H. An Ecological Protection for Wood Material by Hydrolyzed Feather Keratin. *Drewno*, 2022. Vol. 5. P. 14.

52. Ragon K., Entsminger E. Improving Water Resistance of Wood and Wood-Based Products. *Researchgate*, 2023. Vol. 136. P. 15.