

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
Інститут деревообробних технологій і дизайну
Кафедра технології захисту навколишнього середовища і деревини
та безпеки життєдіяльності

Пояснювальна записка

до дипломної роботи магістра на тему:

**Зміни колірних характеристик дубових заготовок у процесі
модифікування аміаком.**

Виконав: студент групи ДМТ-62м
спеціальності 187

«Деревообробні та меблеві технології»
Трубка С.В.

Керівник: к.т.н., доц. Губер Ю. М.

Рецензент:

Ортимська С.В.
(підпис) *Ортимська С.В.*
(прізвище та ініціали)

Львів - 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут
Кафедра

Деревообробних технологій і дизайну
технологій захисту навколишнього середовища
і деревини, безпеки життєдіяльності та соціальних
комунікацій

Освітній рівень
Спеціальність

Магістр
187 «Деревообробні та меблеві технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф.
Кшивецький Б.Я.

“ 10 ” 07 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Трубці Станіславу Вікторовичу

1. Тема роботи:

**Зміни колірних характеристик дубових заготовок у процесі
модифікування аміаком.**

Керівник роботи: доцент, к.т.н. Губер Юрій Мирославович

затверджена наказом по університету від 10.07.2025 року № С-344


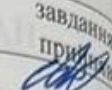
2. Строк подання студентом роботи: до 15.12.2025

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Загальна характеристика роботи, обґрунтування актуальності дослідження.
2. Аналіз досліджень процесу модифікування деревини аміаком.
3. Експериментальні дослідження зміни колірних характеристик деревини дуба у процесі модифікації аміаком.
4. Результати експериментів, висновки та рекомендації
5. Охорона праці

4. Перелік графічного матеріалу: підготувати презентацію роботи в **PowerPoint**.

5. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---------------|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці | доц. Соколовський І.А. |  |  |

6. Дата видачі завдання: 10.07.2025 р.

Керівник роботи


(підпис)

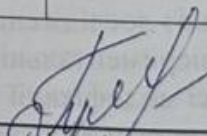
Губер Ю.М.

(прізвище, ініціали)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

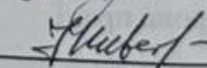
| № з/п | Назва етапів дипломної роботи | Срок виконання етапів роботи | Прізвище |
|-------|---|------------------------------|----------|
| 1 | Загальна частина (обґрунтування актуальності теми дослідження, визначення мети та завдань роботи). | до 25.08.2025 | |
| 2 | Аналіз досліджень процесу модифікації деревини аміаком | до 22.09.2025 | |
| 3 | Експериментальні дослідження зміни колірних характеристик деревини дуба у процесі модифікації аміаком | до 20.10.2025 | |
| 4 | Математична інтерпретація результатів експериментів, висновки та рекомендації | до 24.11.2025 | |
| 5 | Охорона праці | до 01.12.2025 | |
| 6 | Оформлення роботи | до 12.12.2025 | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент


(підпис)

Трубка С.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Губер Ю.М.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота присвячена дослідженню зміни кольору деревини дуба в процесі модифікування парами аміаку. У роботі розглянуто фізико-хімічні основи взаємодії аміаку з компонентами деревини та проаналізовано вплив вологості, температури і тривалості обробки на інтенсивність і глибину забарвлення.

Експериментальні дослідження проведено на дубових заготовках розміром $150 \times 400 \times 30$ мм з вологістю $W=25\%$ і 50% за температури $t=30\text{ }^\circ\text{C}$ та $40\text{ }^\circ\text{C}$ і тривалості витримки $\tau = 24, 48$ і 72 години. Зміни кольору оцінювалися в системі CIE $L^*a^*b^*$ на поверхні та в глибині зразків.

Встановлено, що найбільш ефективним режимом аміачної модифікації є температура $40\text{ }^\circ\text{C}$, вологість деревини 50% і тривалість обробки 72 години, за яких досягається рівномірне та глибоке забарвлення по всій товщині заготовки. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологій декоративної обробки дуба у деревообробній і меблевій промисловості.

ANNOTATION

This diploma thesis is devoted to the study of color changes in oak wood during ammonia modification. The paper analyzes the physicochemical principles of ammonia interaction with wood components and investigates the influence of wood moisture content, treatment temperature, and exposure time on the intensity and depth of color modification.

Experimental studies were carried out on oak specimens with dimensions of $150 \times 400 \times 30$ mm and moisture contents of $W=25\%$ and 50% at temperatures of $t=30\text{ }^\circ\text{C}$ and $40\text{ }^\circ\text{C}$ with exposure times of $\tau = 24, 48,$ and 72 hours. Color changes were evaluated on the surface and at different depths using the CIE $L^*a^*b^*$ color system.

The results showed that the most effective ammonia modification regime is a temperature of $40\text{ }^\circ\text{C}$, wood moisture content of 50% , and an exposure time of 72 hours, which ensures uniform and deep coloration throughout the entire thickness of the specimen. The obtained results can be applied to optimize decorative wood modification technologies in the woodworking and furniture industries.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 8 |
| ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ | 9 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МОДИФІКАЦІЇ ДЕРЕВИНИ | |
| АМІАКОМ | 11 |
| 1.1. Будова та властивості деревини дуба | 11 |
| 1.1.1. Загальна характеристика деревини дуба..... | 11 |
| 1.1.2. Анатомічна будова деревини дуба..... | 11 |
| 1.1.3. Фізико-механічні властивості деревини дуба..... | 12 |
| 1.2. Фізико-хімічні основи модифікації деревини аміаком | 13 |
| 1.2.1. Реакції аміаку з компонентами деревини..... | 13 |
| 1.2.2. Вплив параметрів процесу на зміну кольору..... | 13 |
| 1.2.3. Порівняння з термічними і комбінованими методами | 14 |
| 1.3. Технологічні процеси та обладнання для аміачної модифікації деревини..... | 17 |
| 1.3.1. Камерні методи аміачної обробки..... | 17 |
| 1.3.2. Лабораторні установки і малогабаритні системи | 17 |
| 1.4. Колориметричні системи та методи оцінювання кольору..... | 18 |
| 1.4.1. Основи колориметрії і системи вимірювання..... | 18 |
| 1.4.2. Практичне застосування системи CIE Lab* у дослідженнях деревини | 18 |
| 1.4.3. Математичні методи аналізу результатів..... | 18 |
| 1.5. Аналіз сучасних наукових досліджень модифікації деревини аміаком..... | 19 |
| 1.6. Порівняльний аналіз аміачної модифікації деревини різних порід | 19 |
| 1.6.1 Хімічні процеси, що відбуваються під час аміачної модифікації | 19 |
| 1.6.2 Вплив на анатомічну структуру і фізичні властивості..... | 20 |
| 1.6.3. Особливості зміни кольору залежно від породи..... | 21 |
| 1.6.4. Фізико-хімічна інтерпретація ефектів | 21 |
| 1.6.5. Практичне значення аміачної модифікації..... | 22 |

| | |
|---|-----------|
| Висновки до розділу 1 | 22 |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ | 24 |
| 2.1. Мета і завдання експериментальних досліджень | 24 |
| 2.2. Матеріали дослідження (дубові заготовки, реактиви, обладнання) | 24 |
| 2.3. Опис лабораторної установки для модифікації деревини аміаком | 25 |
| 2.4. Підготовка зразків і проведення експерименту | 26 |
| 2.5. Методика вимірювання кольору в системі CIE Lab* | 29 |
| 2.5.1. Суть методу | 29 |
| 2.5.2. Процедура вимірювання..... | 30 |
| 2.5.3. Обробка результатів..... | 31 |
| 2.5.4. Точність і відтворюваність..... | 31 |
| 2.6. Розрахунок концентрації аміаку в камері | 32 |
| 2.6.1. Кількість аміаку, що може перейти в газову фазу..... | 32 |
| 2.6.2. Початкова кількість речовини повітря в камері..... | 33 |
| Висновки до розділу 2 | 33 |
| РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ | 36 |
| 3.1. Експериментальні дані зміни кольору деревини дуба при різних режимах | 36 |
| 3.1.1. Глибина проникнення кольору за $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 37 |
| 3.1.2. Глибина проникнення кольору за $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 38 |
| 3.1.3. Колориметричні результати (L, a, b*) для 9 зразків..... | 39 |
| 3.2. Розрахунок ΔE для поверхні зразків..... | 39 |
| 3.2.1. Аналіз залежності ΔE від тривалості обробки (t) | 40 |
| 3.3. Візуальні результати експерименту (фотофіксація зразків) | 42 |
| 3.4. Аналіз впливу вологості, температури та часу на зміну кольору | 44 |
| Висновки до розділу 3..... | 50 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРОВЕДЕННЯ | |
| ЕКСПЕРИМЕНТУ | 52 |
| 4.1. Характеристика небезпечних властивостей аміаку | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2. Засоби індивідуального захисту та вентиляція | 53 |
| 4.3. Організація безпечної роботи з герметичними камерами | 53 |
| 4.4. Пожежна безпека та дії у випадку аварійних ситуацій | 54 |
| Висновки до розділу 4 | 55 |
| ВИСНОВКИ | 56 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 60 |
| ДОДАТКИ | |

ВСТУП

Деревина є одним із найдавніших і водночас найперспективніших конструкційних матеріалів, що широко застосовується у будівництві, меблевій промисловості та різних галузях виробництва. Її природні властивості – міцність, легкість, естетичність – поєднуються з екологічною безпечністю та відновлюваністю ресурсу. Водночас деревина має низку недоліків: гігроскопічність, схильність до біологічного руйнування, неоднорідність структури та обмежена стабільність розмірів. Саме тому актуальним напрямом сучасних досліджень є модифікування деревини з метою покращення її експлуатаційних характеристик.

Одним із найефективніших способів хімічної модифікації є обробка деревини аміаком, або аміачна фумігація. Цей метод широко використовується у світі для декоративного тонування дубової деревини. Аміак реагує з дубильними речовинами (танінами) у структурі клітин, що призводить до зміни кольору деревини від світло-жовтого до темно-коричневого. На відміну від фарбування, такий ефект є стабільним, проникає на глибину матеріалу й не втрачається при подальшій обробці.

Аміак, завдяки своїй здатності проникати у клітинну структуру та взаємодіяти з компонентами деревини може суттєво змінювати її фізико-механічні та хімічні властивості. Таке оброблення сприяє підвищенню розмірної стабільності, зміні кольору, покращенню технологічних характеристик при подальшій механічній обробці, а також може впливати на стійкість до біологічних чинників.

Вивчення впливу аміачної модифікації на властивості деревини має важливе значення як з наукової, так і з практичної точки зору. З одного боку, це дозволяє глибше зрозуміти механізми хімічних перетворень у структурі деревини, а з іншого – відкриває можливості для створення нових матеріалів із покращеними характеристиками, що відповідають сучасним вимогам екологічності та довговічності.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процес модифікування деревини дуба поєднує високу декоративність із екологічною безпечністю. Метод не потребує використання пігментів чи лаків, зберігає природну текстуру деревини та підвищує її стійкість до старіння. У контексті переходу деревообробної промисловості на маловідходні технології та екологічно чисті процеси цей напрям є особливо важливим.

Серед твердолистяних порід дуб звичайний (*Quercus robur*) є основним об'єктом досліджень через високий вміст танінів, які активно реагують з аміаком, утворюючи стійкі забарвлені сполуки. Характер зміни кольору при аміачній модифікації залежить від низки параметрів — вологості деревини, температури, концентрації аміаку та тривалості обробки. Визначення впливу цих чинників є важливим завданням для оптимізації технологічного процесу.

Мета роботи. Метою роботи є встановлення впливу технологічних параметрів модифікування деревини дуба, таких як температура, тривалість обробки, вологість деревини, концентрація аміаку на колірні характеристики дубових заготовок.

Практична цінність. У результаті експериментальних і теоретичних досліджень розроблено рекомендації щодо значень режимних параметрів модифікування деревини дуба аміаком для отримання заданих колірних характеристик. Це дозволить підвищити експлуатаційні властивості виробів з деревини дуба, які повинні бути стійкими до стирання та змін кольору.

Обґрунтування і достовірність висновків і рекомендації підтверджуються узгодженістю результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Отримані висновки не перечать основним твердженням науки та результатам робіт інших дослідників. Дослідження проводились в рамках основних напрямків діяльності Національного лісотехнічного університету України.

Основні завдання роботи:

- провести аналіз досліджень процесу модифікування деревини аміаком;

- розробити методику проведення досліджень процесу модифікування дубових заготовок аміаком;
- провести аналіз результатів та надати рекомендації з визначення тривалості процесу, температури та вологості деревини для досягнення заданих колірних характеристик дубових сортиментів.
- надати рекомендації з охорони праці та захисту навколишнього середовища під час проведення процесу модифікування деревини.

Апробація роботи. Матеріали досліджень доповідались та обговорювались на 77-й студентській науково-практичній конференції в Національному лісотехнічному університеті України.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається із вступу, загальної характеристики роботи, чотирьох розділів основного тексту, основних висновків, переліку використаних джерел та додатків. Основний матеріал викладений на 60 сторінках друкованого тексту, містить 15 рисунків, 20 таблиць та бібліографію в кількості 21 назви.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МОДИФІКАЦІЇ ДЕРЕВИНИ АМІАКОМ

1.1. Будова та властивості деревини дуба

1.1.1. Загальна характеристика деревини дуб

Дуб (*Quercus robur*) — одна з найцінніших твердолистяних порід, яка характеризується високою міцністю, зносостійкістю та декоративними властивостями. Його деревина широко застосовується у виробництві меблів, паркету, будівельних елементів. Завдяки високому вмісту дубильних речовин (танінів), дуб є ідеальним матеріалом для модифікації аміаком, що дозволяє отримати глибокий темний колір і покращену стабільність відтінку [11].

1.1.2. Анатомічна будова деревини дуба

Деревина дуба має кільцесудинну структуру: судини ранньої деревини значно більші за пізні, що створює виражений малюнок річних кілець.

Основні анатомічні елементи — волокна, судини, серцевинні промені та паренхімні клітини. Така структура зумовлює різну проникність уздовж і впоперек волокон. Судини ранньої деревини сприяють кращому проникненню газів і парів аміаку, що забезпечує більш глибоку модифікацію [11].

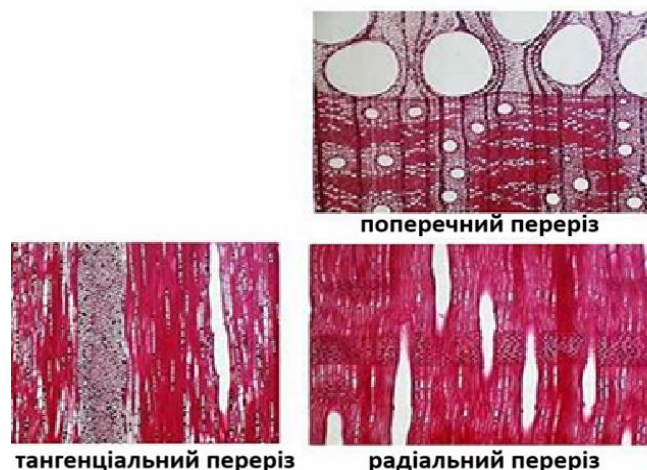


Рис.1.1. Поперечний, радіальний та тангенціальний зрізи деревини дуба (*Quercus* sp.): судини, волокна, серцевинні промені. [17]

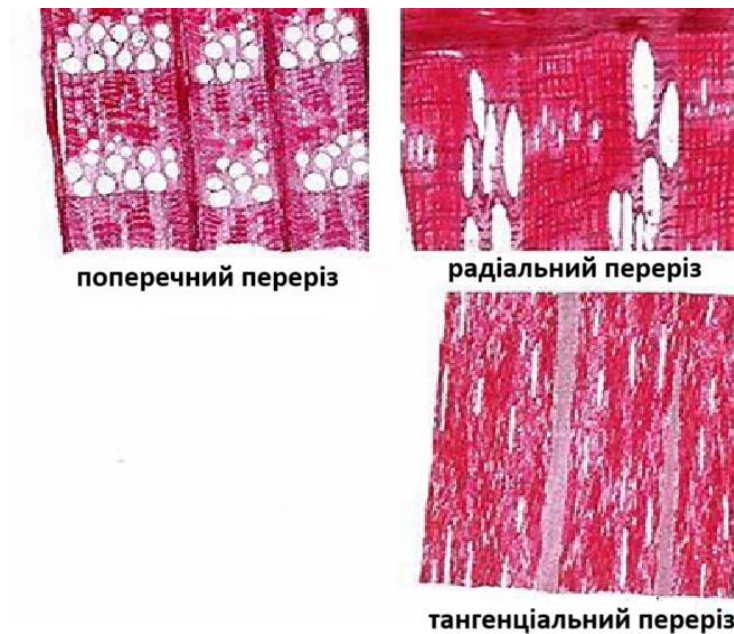


Рис.1.2. Мікрофотознімок деревини дуба: поперечний (cross section), радіальний (radial section) та тангенціальний (tangential section) зрізи. [18]

1.1.3. Фізико-механічні властивості деревини дуба

Дуб має щільність 680–760 кг/м³ при вологості 12 %, твердість за Брінеллем 34–37 МПа, межу міцності на стиск 50–60 МПа. Гігроскопічність дуба висока, тому зміна вологості значно впливає на об'ємні деформації та проникність деревини [11]. Висока пористість і наявність танінів є ключовими факторами для ефективного впливу аміаку — чим більша вологість, тим активніше відбувається реакція між аміаком і фенольними сполуками.

1.2. Фізико-хімічні основи модифікації деревини аміаком

1.2.1. Хімічна взаємодія аміаку з компонентами деревини

Модифікація деревини аміаком (так звана *аміачна фумігація*) ґрунтується на взаємодії газоподібного аміаку з фенольними сполуками (танінами) у клітинних стінках дуба. Аміак реагує з дубильними речовинами, утворюючи амонійні комплекси, що мають темніший відтінок [2].

У роботі Šerňák і Dejmal [1] показано, що зміна кольору деревини дуба пов'язана з утворенням хімічно зв'язаних азотовмісних сполук у лігніно-вуглецевій матриці деревини. При цьому зміни відбуваються переважно у зовнішніх шарах деревини, однак при підвищеній температурі й вологості реакція може проходити на всю товщину зразка.

1.2.2. Вплив технологічних параметрів на зміну кольору

За даними Miklešić та співавт. [2], інтенсивність забарвлення дуба після аміачної обробки залежить від тривалості, температури та вологості деревини.

- За вологості $W=25\%$ колір змінюється незначно, тоді як за $W=50\%$ з'являється насичений темно-коричневий відтінок.
- Підвищення температури з $t=30\text{ }^\circ\text{C}$ до $40\text{ }^\circ\text{C}$ прискорює реакцію й збільшує загальну колірну різницю ΔE на 25–30 % [3].
- Тривалість процесу понад $\tau=48$ годин забезпечує глибшу і рівномірнішу пігментацію [1, 3].

Таким чином, головними чинниками, що визначають ефективність аміачної модифікації, є вологість деревини, температура середовища та тривалість експозиції.



Рис.1.3 Зміна кольору дубової деревини через аміачну обробку: необроблений зразок (ліворуч) і оброблений (праворуч). [19]



Рис.1.4. Зміна кольору дубової деревини при аміачному фумінгу: необроблений зразок, злегка затемнений і сильно затемнений. [20]

1.2.3. Порівняння аміачної модифікації з термічними та комбінованими методами оброблення деревини.

У сучасній деревообробній промисловості для зміни кольору та властивостей деревини застосовуються різні методи фізико-хімічного впливу, серед яких найбільш поширеними є термічне оброблення, хіміко-термічні методи та аміачна

модифікація. Кожен із цих підходів має власні механізми впливу, переваги та обмеження.

Термічні методи модифікації деревини

Термічне оброблення передбачає нагрівання деревини до температур 160–220 °С у середовищі водяної пари, інертного газу або вакууму. Внаслідок високотемпературного впливу відбуваються такі процеси:

- часткове руйнування геміцелюлоз;
- деградація лігніну;
- зміна спектральних характеристик деревини (зменшення L^* , зростання a^* і b^*);
- зниження гігроскопічності.

Термічна модифікація забезпечує потемніння деревини, однак цей процес має низку недоліків:

- зниження міцнісних характеристик;
- крихкість матеріалу;
- висока енергомісткість процесу;
- обмежений контроль відтінку кольору.

Забарвлення при термічному обробленні формується переважно за рахунок термічної деградації компонентів клітинної стінки, а не через хімічну взаємодію з екстрактивними речовинами.

Комбіновані (термохімічні) методи

Комбіновані методи поєднують нагрівання з дією хімічних реагентів (пари, газу, розчини). До таких методів належать:

- оброблення деревини парою з наступним нагріванням;

- термічне оброблення у присутності лугів;
- комбіноване термо-аміачне оброблення.

Ці методи дозволяють отримати більш насичений колір, однак часто супроводжуються:

- складністю контролю технологічних параметрів;
- неоднорідністю кольору по товщині заготовки;
- підвищеними вимогами до обладнання та безпеки.

Аміачна модифікація деревини

Аміачна модифікація є хіміко-фізичним методом, який відбувається за порівняно низьких температур ($t=20-40$ °C) та базується на взаємодії аміаку з дубильними речовинами та фенольними компонентами деревини.

Основними перевагами аміачної модифікації є:

- збереження механічних властивостей деревини;
- формування природного темного кольору без термічної деградації;
- можливість глибокого проникнення забарвлення за оптимальних умов вологості;
- висока світлостійкість отриманого кольору;
- відсутність поверхневих пігментів і плівок.

На відміну від термічних методів, при аміачній модифікації забарвлення формується внаслідок хімічної реакції з танінами, а не через руйнування структури деревини.

1.3. Технологічні процеси та обладнання для аміачної модифікації деревини

1.3.1. Принципи та конструктивні вимоги

Модифікація проводиться в герметичних камерах, у яких підтримується постійна температура ($t=30-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) і насичення атмосфери парами аміаку. Камера має бути оснащена клапаном контролю тиску, датчиками температури й герметичними ущільненнями для запобігання витоку газу. Типова лабораторна установка складається з металевої ємності, терморегулятора, піддона з аміачною водою та тримачів для зразків [4].

1.3.2. Приклади експериментальних систем

У дослідженнях Міклеїс та ін. [2] застосовували камеру з контрольованою температурою $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ і концентрацією аміаку $\sim 15\%$. У роботі Stachowiak-Wencek і співавт. [3] аміак у водному розчині 25% використовувався для обробки дубових зразків протягом $\tau=72$ годин при температурі $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дало найвищий показник ΔE .



Рис.1.5. Лабораторна фумігаційна камера із панеллю керування температурою.
Джерело: Labsol Fumigation Chamber [21]

1.4. Колориметричні системи і методи оцінювання кольору

1.4.1. Система CIE Lab*

Колірні зміни оцінюють у системі CIE Lab*,

де

L^* — світлота,

a^* — координата «зелений-червоний»,

b^* — координата «синій-жовтий».

Загальна різниця кольору визначається формулою:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1.1)$$

Ця система дозволяє кількісно оцінити зміну кольору після модифікації.

1.4.2. Використання CIE Lab* у дослідженнях аміачної модифікації

Міклешіć та ін. [2] встановили, що аміачна обробка дуба зменшує світлоту L^* на 30–40 %, підвищує значення a^* і b^* , що свідчить про потемніння і тепліший відтінок деревини. Šermák і Dejmal [1] визначили $\Delta E \approx 35\text{--}38$ після $t=24$ -годинної експозиції при $t=40$ °C, що вважається суттєвою зміною кольору згідно з колориметричними критеріями.

1.4.3. Статистична обробка результатів

Для узагальнення результатів використовують регресійний аналіз, побудову графіків залежності ΔE від температури, вологості та часу. Методичні підходи наведено у працях Чопенка, Кійка й Кушпіта [12], де описано використання дисперсійного аналізу та методів оцінки достовірності експериментальних даних.

1.5. Аналіз сучасних досліджень

Порівняння робіт Miklečić et al. [2], Čermák & Dejmál [1], Stachowiak-Wencek et al. [3] і Machová et al. [4] показує:

- аміачна модифікація — ефективний метод декоративного забарвлення дуба;
- підвищення температури та вологості покращує рівномірність кольору;
- зміна кольору не супроводжується значним зниженням механічних властивостей;
- комбінація аміачної обробки з попереднім зволоженням деревини дає найкращі результати.

1.6. Порівняльний аналіз аміачної модифікації деревини різних порід

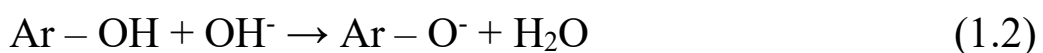
Модифікація деревини аміаком є різновидом хімічної обробки, що базується на здатності аміаку взаємодіяти з поліфенольними компонентами (танінами, лігніном, екстрактивними речовинами) та полярними функціональними групами вуглеводної частини деревини. У результаті відбувається зміна кольору, часткова пластифікація, модифікація структури клітинних стінок і зміна фізико-механічних властивостей. Ефект залежить від породи деревини, вологості, температури, концентрації аміаку та тривалості експозиції.

1.6.1. Хімічні процеси, що відбуваються під час аміачної модифікації

Під час впливу аміаку (NH_3 або NH_4OH) на деревину відбуваються такі процеси:

Реакції з фенольними компонентами лігніну та танінами:

Таніни дуба містять фенольні гідроксильні групи ($-\text{OH}$). У лужному середовищі:



Далі відбувається взаємодія з аміаком:



утворення азотовмісних темних комплексів, які відповідають за потемніння дуба. Ar — ароматичне кільце фенольної сполуки

Це спричиняє утворення амінопохідних фенолів, які мають темніший колір і знижують світлоту L^* деревини. Візуально зразок набуває буро-коричневих відтінків, що нагадують старіння або дублення деревини [13].

1. Зміна кислотності середовища: аміак діє як слабка основа, нейтралізуючи частину вільних кислот, тому рН поверхні зростає з 4,5–5,0 до 7–8,5.
2. Пластицизація целюлозно-геміцелюлозного комплексу: NH_3 розриває водневі зв'язки між макромолекулами целюлози, що тимчасово знижує кристалічність і підвищує еластичність деревини [16].
3. Випаровування та рекристалізація: після видалення аміаку частина внутрішніх зв'язків перебудовується, утворюючи нову стабільну конфігурацію з дещо вищою щільністю і зміненими оптичними властивостями.

1.6.2. Вплив на анатомічну структуру і фізичні властивості

Внаслідок взаємодії з аміаком змінюється проникність, густина і гігроскопічність деревини. За даними Stanciu та ін. [15], після 60-денної обробки 10 % розчином NH_4OH деревина робінії (*Robinia pseudoacacia* L.) показала:

- зменшення коефіцієнта водопоглинання на 12 %;
- зростання щільності на 18–22 %;
- збільшення межі міцності на вигин на 8–10 %;
- потемніння кольору ($\Delta E \approx 22,1$).

Мікроскопічний аналіз підтвердив ущільнення клітинних стінок і часткове зменшення порового простору, що пояснює покращення механічних властивостей.

Для бука (*Fagus sylvatica* L.) Doczekalska та ін. [14] зафіксували, що після термохімічної обробки газоподібним аміаком (до 100 °С, 2 год) у поєднанні з ущільненням деревини:

- показник L^* зменшився з 72,8 до 59,3;
- твердість за Бринеллем зростає на $\approx 40\%$;
- модуль пружності – на 15 %;
- коефіцієнт стискання зменшився, що вказує на підвищення стабільності після охолодження.

Автори відзначили також зменшення інтенсивності смуг гідроксильних груп (3400 см^{-1}) у FTIR-спектрах, що підтверджує утворення нових азотовмісних зв'язків.

1.6.3. Особливості зміни кольору залежно від породи

Weigl та ін. [13] показали, що інтенсивність зміни кольору прямо пропорційна вмісту танінів у деревині. Дуб (*Quercus robur*) демонструє максимальне потемніння ($\Delta E \approx 25\text{--}30$ за $t=30\text{ }^\circ\text{C}$ / $\tau=72$ год), бук – середнє ($\Delta E \approx 15\text{--}20$), тоді як клен і модрина – менше ($\Delta E \approx 8\text{--}10$). Колірні координати після обробки зміщуються у бік зменшення L^* (світлота) і збільшення a^* , b^* (червоні й жовті тони), що відповідає теплим коричневим відтінкам.

1.6.4. Фізико-хімічна інтерпретація ефектів

Під впливом аміаку деревина зазнає комплексної термохімічної дії:

- Хімічний ефект: аміак вступає в реакцію з фенолами, альдегідами та кетонами, утворюючи забарвлені продукти типу *іміно-та амінофенолів*.

- Фізичний ефект: аміак, завдяки своїй високій полярності ($\epsilon = 22$ при $25\text{ }^\circ\text{C}$), проникає у клітинні стінки, діє як пластифікатор, збільшує внутрішню рухливість макромолекул.
- Оптичний ефект: зміни в системі хромофорів лігніну призводять до поглинання у видимій області спектра (400–600 нм), що викликає потемніння кольору.
- Тепловий ефект: за підвищених температур (40–100 $^\circ\text{C}$) реакції полімеризації продуктів взаємодії NH_3 з фенолами пришвидшуються, утворюючи стабільний темно-бурий відтінок.

1.6.5. Практичне значення аміачної модифікації

1. Декоративний ефект: дозволяє імітувати «старіння» дуба без використання морилок; отриманий колір стійкий до УФ-випромінювання [13].
2. Покращення механічних властивостей: для бука і робінії відзначається збільшення твердості та стабільності форми [14–15].
3. Пластицизація: аміак ефективно знижує крихкість деревини, полегшує гнуття елементів, що підтверджено класичними дослідженнями Schuerch (1971) [16].
4. Комбіновані методи: сучасні дослідження пропонують поєднувати аміачну обробку з ущільненням або термообробкою для досягнення одночасного декоративного та функціонального ефекту [14].

Висновки до розділу 1

1. Дубова деревина є оптимальним матеріалом для аміачної модифікації завдяки високому вмісту танінів і пористій структурі [11].
2. Механізм зміни кольору зумовлений реакцією аміаку з фенольними сполуками, що призводить до утворення темних азотовмісних пігментів [2].

3. Основними технологічними параметрами є вологість, температура і тривалість експозиції, які безпосередньо впливають на ΔE [1, 3].
4. Для кількісної оцінки зміни кольору доцільно застосовувати систему CIE Lab* [2].
5. Аміачна модифікація може бути рекомендована як екологічно безпечна альтернатива термічній обробці деревини [4]

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Мета і завдання експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є встановлення закономірностей зміни кольору деревини дуба звичайного (*Quercus robur*) у процесі модифікації аміаком залежно від вологості, температури та тривалості обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити вплив вологості деревини ($W=25\%$ і 50%) на інтенсивність забарвлення після аміачної обробки;
- встановити вплив температури обробки ($t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) на колірні характеристики деревини;
- визначити вплив тривалості експозиції ($\tau=24, 48$ і 72 години) на зміну кольору за системою CIE Lab*;
- розрахувати концентрацію парів аміаку у реакційній камері та оцінити її вплив на ефективність процесу;
- здійснити порівняльний аналіз результатів і визначити оптимальні параметри модифікації.

2.2. Матеріали дослідження

Дослідження проводилося на зразках деревини дуба звичайного (*Quercus robur L.*), вирощеного в умовах Західної України. Для експерименту було підготовлено десять зразків розмірами $300 \times 100 \times 30$ мм.

Половина зразків мала вологість $W=25\%$, інша половина — $W=50\%$, що забезпечувалося шляхом кондиціювання у виробничих умовах. Кожен зразок попередньо шліфували абразивом № 180 для зменшення впливу шорсткості на відбиття світла.

Як модифікатор використовувався аміак водний (25%), що містить масову частку аміаку 25% . Випробування проводили із застосуванням 200 мл розчину

на одну експозицію. Аміак забезпечує активну взаємодію з фенольними компонентами дуба (танінами), формуючи стійке забарвлення деревини [2, 3].

Для проведення експериментів використовувалася металева герметична камера, обладнана:

- клапаном для контролю тиску;
- терморегулятором ($t=30-40\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- термодатчиком типу ТСМ-138;
- внутрішнім піддоном для аміачного розчину;
- кронштейнами для горизонтального розташування зразків.

Перед початком досліду камера герметизувалася за допомогою ущільнювальної прокладки і фіксувалася болтовим замком.

2.3. Опис лабораторної установки для модифікації деревини аміаком

Експериментальна установка представляла собою металеву камеру циліндричної форми діаметром 400 мм і висотою 600 мм. Загальний об'єм становив 75,4 л



Рис. 2.1. Лабораторна установка для модифікації деревини аміаком.

У нижній частині камери розташовано піддон із 200 мл водного розчину аміаку (25 %), над яким на решітці встановлювалися дубові заготовки. Камера нагрівалася за допомогою зовнішнього електричного термоконтролера, що підтримував температуру $t=30 \pm 1$ °C або $t=40 \pm 1$ °C залежно від серії дослідів.

Система оснащена запобіжним клапаном контролю тиску, який забезпечував робочий надлишковий тиск не більше 1,2 кПа, що відповідає умовам безпечного проведення експериментів [5].

Усі елементи, які контактували з парами аміаку, виконано з нержавіючої сталі або хімічно стійких полімерів (PTFE, EPDM), щоб запобігти корозії та втратам реагенту.

2.4. Підготовка зразків і проведення експерименту

Перед початком дослідження дубові зразки були кондиціоновані до відповідних рівнів вологості — $W=25$ % та 50 %. Визначення вологості здійснювали ваговим методом та промисловим вологоміром MERLIN HM9.



Рис.2.2. Вологомір фірми MERLIN типу HM9

Кожен зразок дуба мав розміри $300 \times 100 \times 30$ мм. Поверхня зразків була шліфувана абразивним папером із зернистістю P180 у напрямку волокон для зменшення впливу мікрошорсткості на відбиття світла. Перед обробкою усі заготовки маркували, фіксуючи вихідну масу, вологість і координати кольору L^* , a^* , b^* .

Вимірювання кольору проводили до і після аміачної обробки за допомогою портативного спектроденситометра X-Rite eXact (США), який широко використовується у дослідженнях деревини та підтверджений у наукових роботах Miklečić et al. (2012), Čermák & Dejmál (2013) та Stachowiak-Wencek et al. (2020) [1–3].



Рис.2.3. Спектроденситометр X-Rite eXact (США)

Прилад забезпечує вимірювання у колірному просторі CIE $L^*a^*b^*$ та має такі технічні характеристики:

- діаметр вимірювального отвору — 8 мм;
- джерело світла — D65 (імітація денного освітлення);
- колірні системи — CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*C^*h^*$;
- похибка вимірювання $\Delta E \leq 0,1$;
- режим — відбитий колір непрозорих матеріалів.

Перед початком вимірювань прилад калібрували за допомогою білого еталонного зразка, що входить до комплекту виробника. Для кожної заготовки дуба виконували три заміри у різних точках поверхні (не ближче ніж 30 мм до країв), після чого визначали середні значення координат L^* , a^* , b^* . Аналогічну методику застосовано у дослідженнях кольору дубової деревини після аміачної модифікації, наведених у [1, 2].

Проведення експерименту

Дослідження проводили у два етапи за різних температур: $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для кожного режиму використовували герметичну металеву камеру об'ємом 75,4 л (розрахунок наведено у пункті 2.3). На дно камери встановлювали піддон із 200 мл 25 % водного розчину NH_4OH , над яким розміщували дубові заготовки на решітці таким чином, щоб вони не контактували з рідиною. Камеру герметизували й підтримували постійну температуру за допомогою зовнішнього терморегулятора.

Для контролю процесу обробки передбачали три часові інтервали:

- 24 години — короткочасна експозиція;
- 48 годин — середня експозиція;
- 72 години — тривала експозиція.

Через кожен проміжок часу з камери вилучали по два зразки (один із вологістю $W=25\%$, інший — $W=50\%$) і виконували повторне вимірювання кольору на тих самих ділянках, що й перед модифікацією.

Результати вимірювань заносили до таблиці з координатами L^* , a^* , b^* , після чого обчислювали загальну зміну кольору ΔE за стандартною формулою (1.1) системи CIE $L^*a^*b^*$ [6]:

Математичну обробку результатів проводили з використанням методів статистичного аналізу, наведених у Чопенко Н. Ф., Кійко О. А., Кушпін А. С. (2004) — «Методичні вказівки: застосування методів статистичного аналізу в

деревообробленні» [12]. На основі розрахованих значень ΔE будували графіки залежностей від часу, температури та вологості.

Після завершення кожної серії експериментів камеру провітрювали та нейтралізували залишкові пари аміаку 2 % розчином оцтової кислоти відповідно до вимог ДСТУ 2293:2019 «Охорона праці. Загальні вимоги безпеки при роботі з аміаком» [5].

2.5. Методика вимірювання кольору в системі CIE L*a*b*

Визначення кольору деревини дуба проводили у колориметричній системі CIE L*a*b*, яка є міжнародним стандартом для оцінювання колірних характеристик матеріалів за приладами типу спектрофотометра або колориметра. Методика базується на стандартах ISO 7724-3:1984 «Paints and varnishes — Colorimetry — Calculation of colour differences» та ASTM D2244-21 «Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates» [6, 7].

2.5.1. Суть методу

Система CIE L*a*b* (або CIELab) була розроблена Міжнародною комісією з освітлення (CIE) для числового опису кольору видимих об'єктів. Вона ґрунтується на трьох параметрах:

- L* — світлота, що варіює від 0 (чорний) до 100 (білий);
- a* — кольорова координата за віссю червоний-зелений (позитивні значення — червоні відтінки, негативні — зелені);
- b* — координата за віссю жовтий-синій (позитивні значення — жовті відтінки, негативні — сині).

Зміна кольору внаслідок обробки деревини виражається як загальна колірна різниця ΔE , що розраховується за формулою (1.1):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

де ΔL^* , Δa^* , Δb^* — різниці між координатами кольору до і після модифікації.

2.5.2. Процедура вимірювання

Вимірювання координат L^* , a^* , b^* проводили спектроденситометром X-Rite eXact відповідно до методики, описаної у роботах Miklečić et al. (2012) та Čermák & Dejmal (2013) [1, 2].



Рис.2.4 Процес вимірювання координат L^* , a^* , b^*

Перед початком досліду прилад калібрували на білому еталоні ($Y = 93,7$; $x=0,3157$; $y = 0,3323$). Для кожного зразка дуба проводили три вимірювання в різних точках поверхні на відстані не менше 30 мм від краю, щоб уникнути впливу неоднорідності структури. Середні значення координат використовували для подальшого розрахунку ΔE .

Прилад працював у режимі:

- Джерело світла: D65 (імітація денного освітлення, 6500 K);
- Геометрія вимірювання: $0^{\circ}/45^{\circ}$;
- Розмір діафрагми: 8 мм;
- Спостерігач: стандартний 10° .

Усі вимірювання виконували за температури $t=20 \pm 2$ °C і відносної вологості $W=55 \pm 5$ %.

2.5.3. Обробка результатів

Отримані значення координат L^* , a^* , b^* обробляли статистично: визначали середні значення, стандартні відхилення та коефіцієнти варіації. Для цього застосовували методи дисперсійного та регресійного аналізу відповідно до методичних рекомендацій Чопенка, Кійка та Кушпіта (2004) [12].

Порогові значення зміни кольору інтерпретували за шкалою ASTM D2244-21:

- $\Delta E < 1$ — зміни не помітні візуально;
- $1 \leq \Delta E < 3$ — незначні зміни, ледве помітні;
- $3 \leq \Delta E < 6$ — помітні зміни кольору;
- $\Delta E \geq 6$ — суттєва зміна, видима неозброєним оком.

Подібний підхід використовували у дослідженнях Stachowiak-Wencek et al. (2020), де визначення ΔE дозволило кількісно оцінити вплив водного аміаку на зміну кольору дубової деревини [3].

2.5.4. Точність і відтворюваність

Середня похибка вимірювання координат кольору для X-Rite eXact не перевищує $\pm 0,07\Delta E$, що відповідає вимогам ISO 7724-3 [7]. Кожне вимірювання виконували у трьох повтореннях, що забезпечує достовірність результатів і можливість подальшої статистичної оцінки. Отримані дані

використовували для побудови залежностей ΔE від температури, вологості та часу обробки, що наведено у розділі 3.

2.6. Розрахунок концентрації аміаку в камері

Вихідні дані (за умовою):

- Об'єм камери (циліндр): $D=0,4\text{м}$ $H=0,6\text{м}$.

$$V_k = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot H = 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 0,6^2 = 0,0754\text{м}^3 = 75,4\text{л} \quad (2.1)$$

- Об'єм аміачної води: $V_{\text{розч.}}=200$ мл
- Густина 25% розчину: NH_4OH : $\rho = 1,07\text{г/мл}$.
- Масова частка NH_4OH у розчині: $\omega=25\%$.
- Молярні маси: $M(\text{NH}_4\text{OH})=35\text{г/моль}$; $M(\text{NH}_3) = 17\text{г/моль}$.
- Молярна маса повітря: $M_{\text{пов.}}= 29,5\text{г/моль}$.
- Температура процесу: $T_1=30^\circ\text{C}$ і $T_2=40^\circ\text{C}$

2.6.1. Кількість аміаку, що може перейти в газову фазу

1) Маса розчину:

$$m_{\text{розч.}} = \rho \cdot V = 1,07 \cdot 200 \text{ мл} = 214 \text{ г.} \quad (2.2)$$

2) Маса NH_4OH у розчині:

$$m(\text{NH}_4\text{OH}) = 214 \text{ г} \cdot 0,25 = 53,5 \text{ г.} \quad (2.3)$$

3) Еквівалентна маса NH_3 (стехіометрія « $35 \text{ г } \text{NH}_4\text{OH} \rightarrow 17 \text{ г } \text{NH}_3$ »):

$$X = 35/17 \cdot 53,5\text{г} = 26,0 \text{ г } \text{NH}_3. \quad (2.4)$$

Тобто максимально доступна (теоретично) маса аміаку, що може виділитися з 200 мл 25 % NH_4OH , становить $\approx 26 \text{ г } \text{NH}_3$.

4) Кількість речовини NH_3 :

$$n_{\text{NH}_3} = 26/17 = 1726,0 = 1,529 \text{ моль.} \quad (2.5)$$

2.6.2. Початкова кількість речовини повітря в камері

Оцінімо число молів повітря (до внесення аміаку) через рівняння стану ідеального газу:

$$n_{\text{пов.}} = \frac{pV}{RT} \quad (2.6)$$

- При 30°C (303 K):

$$n_{\text{пов.}} = \frac{10325 \times 0,07536}{8,314 \times 303} \approx 3,04 \text{ моль} \quad (2.7)$$

- При 40°C (313 K):

$$n_{\text{пов.}} = \frac{10325 \times 0,07536}{8,314 \times 313} \approx 2,94 \text{ моль} \quad (2.8)$$

Маса повітря:

$$m_{\text{пов.}} = n_{\text{пов.}} \cdot M_{\text{пов.}} (\approx 3,0 \cdot 29,5 \approx 88-90 \text{ г.}) \quad (2.9)$$

2.6.3. Масова частка NH_3 відносно маси повітря в камері (довідково)

$$W_{\text{NH}_3} = \frac{\{m_{\text{NH}_3}\}}{\{m_{\text{NH}_3} + m_{\text{пов.}}\}} = \frac{\{26\}}{\{26 + 89\}} \approx 0,226 \approx 22,6\% \text{ за масою} \quad (2.10)$$

Висновки до розділу 2

У цьому розділі розроблено й описано методику проведення експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення впливу параметрів аміачної модифікації на зміну кольорових характеристик деревини дуба звичайного (*Quercus robur*).

Проведено підбір і підготовку матеріалів — виготовлено 10 дубових заготовок розміром $300 \times 100 \times 30$ мм, розділених на дві групи за рівнем вологості ($W=25\%$ та 50%). Для досліджень використано 25% водний розчин аміаку (NH_4OH) об'ємом 200 мл.

Створено лабораторну установку — герметичну металеву камеру об'ємом 75,4 л, обладнану системою температурного контролю, що дозволяє забезпечити стабільні умови обробки за $t=30\text{ }^\circ\text{C}$ та $40\text{ }^\circ\text{C}$. Розрахунки показали, що при повному випаровуванні аміаку у замкненому об'ємі концентрація газу сягає $(2,3\text{--}3,5) \times 10^5$ мг/м³, що підтверджує необхідність застосування спеціальних засобів безпеки та вентиляції під час експерименту [5].

Для визначення колірних характеристик використано портативний спектроденситометр X-Rite eXact (США), що вимірює координати кольору у системі CIE $L^*a^*b^*$. Методика вимірювань ґрунтувалася на міжнародних стандартах ISO 7724-3:1984 та ASTM D2244-21, а також на рекомендаціях, наведених у працях Miklečić et al. (2012), Čermák & Dejmál (2013) і Stachowiak-Wencek et al. (2020) [1–3, 6, 7].

Для кожного зразка проведено три вимірювання кольору до і після аміачної модифікації, а результати оброблено за допомогою методів дисперсійного та регресійного аналізу відповідно до Чопенка, Кійка та Кушпіта (2004) [12]. Для кількісної оцінки зміни кольору використано показник загальної колірної різниці ΔE , розрахований за класичною формулою системи CIE $L^*a^*b^*$.

У процесі роботи встановлено, що:

- застосована експериментальна методика дозволяє точно визначати зміну кольору дубових заготовок після аміачної обробки;
- обрані режими ($t=30$ і $40\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau=24\text{--}72$ год) охоплюють діапазон, у якому відбуваються суттєві зміни кольору деревини;
- підвищення вологості заготовок до $W=50\%$ забезпечує більш інтенсивне забарвлення, що узгоджується з даними попередніх досліджень [1–3];

- підвищення температури сприяє прискоренню хімічних реакцій між аміаком і дубильними речовинами, що збільшує величину ΔE та глибину проникнення кольору.

Розроблена методика дозволяє отримати кількісно достовірні результати та відтворювані експериментальні умови, що дає змогу перейти до аналізу результатів досліджень у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Експериментальні дані зміни кольору дубових зразків при різних режимах модифікації

Метою експерименту було визначення впливу вологості, температури та тривалості витримки на зміну кольору деревини дуба під дією парів аміаку. Для досліджень було використано 9 зразків дуба, з яких:

- 3 зразки вологістю $W=25\%$
- 6 зразків вологістю $W=50\%$.

Експеримент складався з двох етапів:

1. Обробка трьох зразків з вологістю $W=50\%$ за температури $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ з тривалістю обробки $\tau=24, 48$ та 72 години.
2. Обробка шести зразків за температури $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ з тривалістю обробки $\tau=24, 48$ та 72 години. З них:
 - 3 зразки вологістю $W=25\%$
 - 6 зразків вологістю $W=50\%$.

Після завершення кожного етапу зразки були розрізані, щоб дослідити глибину проникнення кольору (з площини та з торця), а також були проведені колориметричні вимірювання за системою CIE Lab* на поверхні та на глибині 7 мм і 10 мм від поверхні.

3.1.1. Глибина проникнення кольору за температури $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблиця 3.1.

Глибина проникнення кольору за температури $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

| № зразка | Вологість, % | Тривалість, год | Глибина проникнення з площини, мм | Глибина проникнення з торця, мм |
|----------|--------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 50 | 24 | 6 | 9 |
| 2 | 50 | 48 | 9 | 11 |
| 3 | 50 | 72 | 8 | 13 |

Зразки набули темно-коричневого кольору, проникнення збільшувалося з часом.

Найбільша глибина з торця — 13 мм.

3.1.2. Глибина проникнення кольору за температури $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблиця 3.2

Глибина проникнення кольору за температури $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

| № зразка | Вологість, % | Час, год | Глибина проникнення з площини, мм | Глибина проникнення з торця, мм |
|----------|--------------|----------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 4 | 25 | 24 | 4 | 10 |
| 5 | 25 | 48 | 6 | 12 |
| 6 | 25 | 72 | 9 | 16 |
| 7 | 50 | 24 | 5 | 12 |
| 8 | 50 | 48 | 8 | 15 |
| 9 | 50 | 72 | 25 мм (майже вся товщина) | 25 мм (майже вся товщина) |

Зразок №9 ($W=50\text{ }%$, $\tau=72\text{ год}$, $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$) показав найліпше забарвлення майже по всій товщині (30 мм) — це максимально інтенсивна реакція аміаку з дубильними речовинами при оптимальних умовах.

3.1.3. Колориметричні результати (L^* , a^* , b^*) для 9 зразків

Для кожного зразка наведено значення на різних глибинах. Нижче наведено узагальнену таблицю поверхневих значень

Таблиця 3.3

Значення L^* , a^* , b^* на поверхні зразків

| № | T, °C | W, % | t, год | L^* | a^* | b^* |
|---|-------|------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 30 | 50 | 24 | 35.35 | 6,17 | 11,19 |
| 2 | 30 | 50 | 48 | 36.89 | 5,80 | 11,10 |
| 3 | 30 | 50 | 72 | 31.57 | 5,85 | 9,80 |
| 4 | 40 | 25 | 24 | 31.55 | 4,00 | 8,09 |
| 5 | 40 | 25 | 48 | 35.27 | 4,18 | 8,28 |
| 6 | 40 | 25 | 72 | 34.58 | 4,92 | 10,06 |
| 7 | 40 | 50 | 24 | 34.61 | 6,15 | 10,65 |
| 8 | 40 | 50 | 48 | 34.99 | 5,79 | 10,63 |
| 9 | 40 | 50 | 72 | 33.34 | 6,25 | 10,96 |

Контрольний необроблений дуб ($W=10$ % вологість):
 $L^* = 70,8$; $a^* = 8,21$; $b^* = 22,51$

3.2. Розрахунок ΔE для поверхні зразків

Використано контрольний зразок:

$L^* = 70,8$; $a^* = 8,21$; $b^* = 22,51$

Наприклад, ΔE для зразка №1:

$$\Delta L = 35.35 - 70.8 = -35.45$$

$$\Delta a = 6.17 - 8.21 = -2.04$$

$$\Delta b = 11.19 - 22.51 = -11.32$$

$$\Delta E = 37.37.$$

Таблиця 3.4

ΔE усіх зразків:

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ΔE | 37.37 | 35.47 | 40.62 | 41.00 | 36.10 | 36.78 | 38.47 | 37.89 | 39.55 |

Висновок:

$\Delta E > 35$ для всіх зразків \rightarrow зміна кольору дуже сильна, візуально — чітке темно-коричневе забарвлення.

3.2.1. Аналіз залежності ΔE від тривалості обробки (t)

Щоб встановити, як час витримки дубових зразків у середовищі аміаку впливає на зміну кольору, для кожного з дев'яти зразків були розраховані значення ΔE на поверхні.

Результати згруповано за температурою та вологістю.

Таблиця 3.5

1. Режим: $t=30$ °C, вологість $W=50$ %

| τ , год | 24 | 48 | 72 |
|--------------|-------|-------|-------|
| ΔE | 37.37 | 35.47 | 40.62 |

Пояснення

- ΔE зростає з 24 до 72 год.

- Допускається невелике коливання при 48 год, але загальна тенденція — збільшення глибини та інтенсивності забарвлення.
-

Таблиця 3.6

2. Режим: $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, вологість $W=25\%$

| | | | |
|--------------|-------|-------|-------|
| τ , год | 24 | 48 | 72 |
| ΔE | 41.00 | 36.10 | 36.78 |

Пояснення

- Усі зразки стали темнішими порівняно з контролем.
- ΔE трохи зменшується після 24 год → це означає, що при низькій вологості реакція йде повільно, і після початкового швидкого потемніння процес стабілізується.

Таблиця 3.7

3. Режим: $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, вологість $W=50\%$

| | | | |
|--------------|-------|-------|-------|
| τ , год | 24 | 48 | 72 |
| ΔE | 38.47 | 37.89 | 39.55 |

Пояснення

- ΔE приблизно однакове протягом усього періоду.
- Але при 72 год колір стає найглибшим та просочується через усю товщину заготовки, що підтверджує візуальний аналіз.

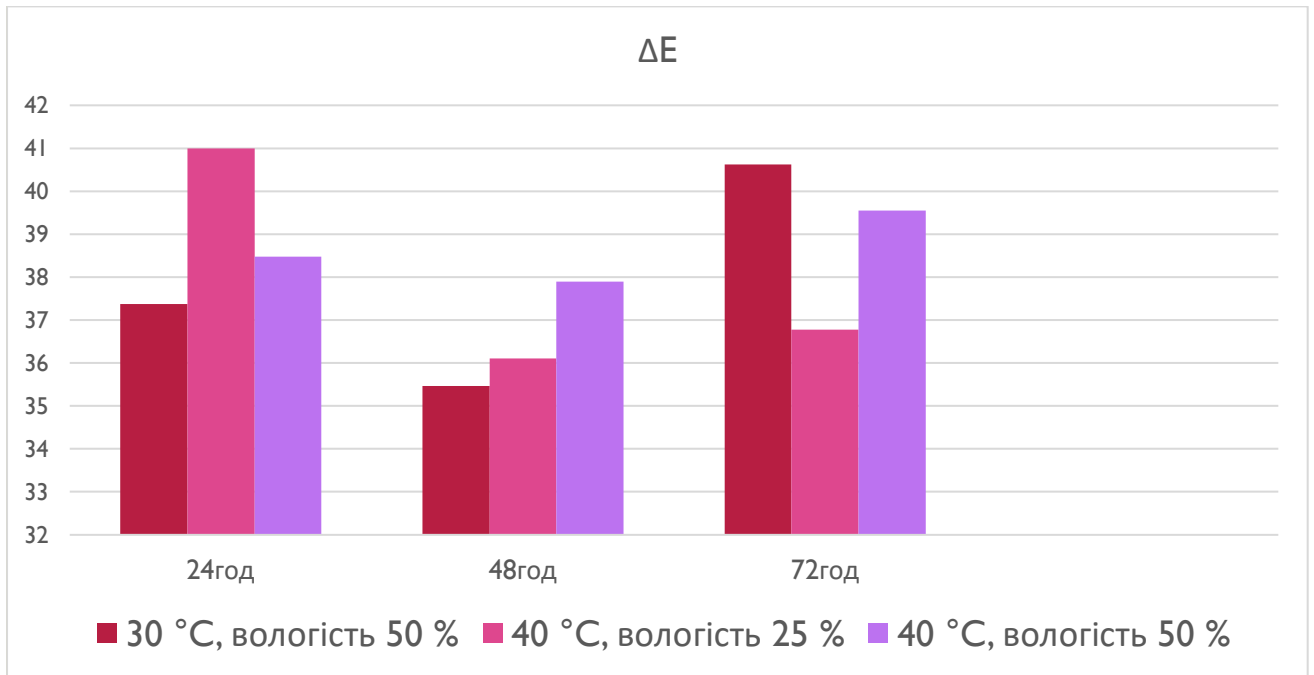


Рис.3.1. Зміни кольору ΔE за різної температури обробки та вологості дубових зразків.

Залежність зміни кольору ΔE від часу витримки дубових зразків при різних температурних режимах. Видно, що найбільш інтенсивні зміни кольору відбуваються при тривалих витримках ($\tau=72$ год) та підвищеній вологості матеріалу.

3.3. Візуальні результати експерименту (фотофіксація)



Рис.3.2 Зміна кольору взірців на поверхні за температури $t=40^{\circ}\text{C}$, вологості $W=50\%$ та тривалості обробки 1 – $\tau=24$ год.; 2 – $\tau=48$ год.; 3 – $\tau=72$ год.



Рис.3.3 Глибина проникнення кольору за температури $t=40^{\circ}\text{C}$, вологості $W=50\%$ та тривалості обробки взірець 1 – $\tau=24$ год.; взірець 2 – $\tau=48$ год. взірець 3 – $\tau=72$ год.



Рис.3.4 Зміна кольору взірців на поверхні за температури $t=40^{\circ}\text{C}$, вологості $W=25\%$ та тривалості обробки взірець 1 – $\tau=24$ год.; взірець 2 – $\tau=48$ год.; взірець 3 – $\tau=72$ год.



Рис.3.5. Глибина проникнення кольору за температури $t=40^{\circ}\text{C}$, вологості $W=25\%$ та тривалості обробки взірець 1 – $\tau=24$ год.; взірець 2 – $\tau=48$ год.; взірець 3 – $\tau=72$ год.

На рис.3.2-3.5 представлено зовнішній вигляд зразків після різних режимів аміачної модифікації. Видно, що зі збільшенням часу та вологості колір переходить від світло-коричневого до темного горіхового. За $t=40^{\circ}\text{C}$ і вологості $W=50\%$ забарвлення рівномірне і майже по всій товщині. На торцях забарвлення глибше, що пов'язано з вищою проникністю судин дуба вздовж волокон.

3.4 Аналіз впливу вологості, температури та часу на зміну кольору

Вологість:

- висока вологість зразків $W=50\%$ дає швидше та глибше проникнення аміаку;
- усі зразки вологістю $W=50\%$ показали на 25–40 % глибше забарвлення, ніж з вологістю $W=25\%$.

Температура:

- за температури $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ реакції відбуваються інтенсивніше;
- зразок №9 ($W=50\%$, $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=72$ год) забарвлений майже по всій товщині.

Тривалість обробки:

- до $\tau=48$ год — забарвлення наростає;
- після $\tau=72$ год — досягається максимальна насиченість.

Аналіз розподілу кольору по товщині зразків

Щоб оцінити не лише зміну кольору на поверхні, а й глибину проникнення забарвлення, для кожного зразка були виконані вимірювання колірних координат L^* , a^* , b^* на трьох рівнях:

- на поверхні;
- на глибині $x=7$ мм;
- на глибині $x=10$ мм від поверхні.

Як еталон використано немодифікований дуб (вологість $W=10\%$):

$L=70,8$; $a=8,21$; $b=22,51$.

Режим $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, вологість $W=50\%$

Для зразка №1 ($\tau=24$ год) значення в середині заготовки ($x=7$ і 10 мм) практично збігаються з еталоном: $L \approx 70\text{--}72$, $a \approx 7,0$, $b \approx 19\text{--}20$. Це означає, що рf $\tau=24$ -годинній витримці й температурі $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ забарвлення зосереджене в

поверхневому шарі (близько 6 мм з площини та 9 мм з торця), а серцевина залишається майже незмінною за кольором.

Для зразка №2 ($\tau=48$ год) вже спостерігається помітне потемніння і на глибині $x=7-10$ мм: L зменшується до 44,2–50,4, тобто внутрішні шари стають помітно темнішими порівняно з еталоном. Це свідчить, що за 48 годин аміак проникає значно глибше вздовж судин і серцевинних променів.

Найбільш виражене забарвлення по товщині дає зразок №3 ($\tau=72$ год): на глибині $x=7-10$ мм $L \approx 39-40$, $a \approx 4,7-5,1$, $b \approx 10-11$. За світлотою ці значення вже наближені до поверхневих, тобто більша частина перетину заготовки має темно-коричневий відтінок. Це узгоджується з візуальним спостереженням глибини проникнення (8 мм з площини, 13 мм з торця) і показує, що за $t=30$ °C, $W=50$ % вологості та $\tau=72$ год формуються досить однорідні колірні шари.

Режим $t=40$ °C, вологість $W=25$ %

Для зразків №4–№6 ($\tau=24, 48, 72$ год, $W=25$ % вологості) картина інша. Хоча поверхня має темний колір ($L \approx 31-35$), значення на глибині $x=7-10$ мм залишаються близькими до еталона: $L \approx 68-71$, $a \approx 8,0$, $b \approx 21-22$.

Це означає, що навіть при підвищеній температурі низька вологість дуба $W=25$ % обмежує дифузію аміаку, і основна частина забарвлення залишається зосередженою у поверхневому шарі ($x=4-9$ мм з площини). Колір ядра практично не змінюється, що видно й по великому контрасту між поверхнею та внутрішніми значеннями L^* .

Режим $t=40$ °C, вологість $W=50$ %

Для зразків №7–№9 ($t=40$ °C, $W=50$ % вологості) спостерігається найгармонійніший розподіл кольору по товщині.

- Зразок №7 ($\tau=24$ год): поверхня вже темна ($L = 34,61$), на глибині $x=7$ мм $L \approx 34,85$, а на $x=10$ мм $L \approx 69,31$. Тобто забарвлений головним чином зовнішній шар та торець (дифузія вздовж волокон).

- Зразок №8 ($\tau=48$ год): на глибині $x=7-10$ мм $L \approx 67-69$, а а та b помітно знижені порівняно з еталоном, що свідчить про початок забарвлення внутрішніх шарів ($x=5-8$ мм з площини, 15 мм з торця).
- Зразок №9 ($\tau=72$ год) демонструє найбільш рівномірний розподіл: на глибині $x=7$ мм $L = 69,0$, $a = 6,81$, $b = 19,54$; на $x=10$ мм $L = 65,08$, $a = 6,76$, $b = 20,32$.

Візуально цей зразок мав насичено коричневий колір майже по всій товщині, що підтверджується як різкою зміною L^* від еталона, так і даними про майже повну глибину проникнення ($z=25$ мм з площини та торця). Практично вся заготовка бере участь у реакції аміаку з дубильними речовинами.

Узагальнення щодо розподілу кольору по товщині

1. За температури $t=30^\circ\text{C}$ і вологості $W=50\%$ проникнення забарвлення відбувається поступово:
 - $\tau=24$ год \rightarrow забарвлений лише поверхневий шар;
 - $\tau=48$ год \rightarrow забарвлення доходить до середніх шарів;
 - $\tau=72$ год більша частина товщини має знижені значення L^* і набуває темного відтінку.
2. За температури $t=40^\circ\text{C}$ і вологості $W=25\%$ навіть тривала обробка ($\tau=72$ год) практично не змінює колір ядра, що свідчить про недостатню кількість вологи для ефективної дифузії NH_3 у глибину.
3. За температури $t=40^\circ\text{C}$ і вологості $W=50\%$ комбінується високий вміст вологи та підвищена температура, тому аміак найефективніше проникає у глибину. Зразок №9 ($\tau=72$ год) показує майже однорідний колір по перетину, що є найбільш бажаним результатом з технологічної точки зору.
4. Отримані результати узгоджуються з літературними даними для дуба та бука, де підкреслюється, що підвищена вологість деревини значно покращує дифузію реагентів і глибину модифікації клітинних стінок.

Значення L, a*, b* на різних глибинах модифікованих зразків дуба

| № зразка | Температура, °С | Вологість, % | Час, год | На поверхні зрізця | | | На глибині 7 мм | | | На глибині 10 мм | | |
|----------|-----------------|--------------|----------|--------------------|------|-------|-----------------|------|-------|------------------|------|-------|
| | | | | L* | a* | b* | L* | a* | b* | L* | a* | b* |
| 1 | 30 | 50 | 24 | 35.35 | 6.17 | 11.19 | 70.40 | 6.97 | 19.47 | 72.27 | 7.21 | 19.75 |
| 2 | 30 | 50 | 48 | 36.89 | 5.80 | 11.10 | 44.24 | 5.15 | 11.79 | 50.43 | 4.25 | 14.69 |
| 3 | 30 | 50 | 72 | 31.5 | 5.85 | 9.80 | 38.99 | 5.11 | 10.80 | 39.85 | 4.69 | 10.27 |
| 4 | 40 | 25 | 24 | 31.55 | 4.00 | 8.09 | 68.38 | 8.05 | 21.83 | 70.00 | 7.87 | 22.19 |
| 5 | 40 | 25 | 48 | 35.27 | 4.18 | 8.28 | 70.79 | 8.03 | 22.44 | 71.03 | 7.83 | 21.49 |
| 6 | 40 | 25 | 72 | 34.58 | 4.92 | 10.06 | 69.23 | 8.46 | 21.64 | 68.90 | 8.32 | 22.00 |
| 7 | 40 | 50 | 24 | 34.61 | 6.15 | 10.65 | 34.85 | 6.88 | 17.84 | 69.31 | 6.89 | 17.66 |
| 8 | 40 | 50 | 48 | 34.99 | 5.79 | 10.63 | 67.90 | 6.78 | 19.08 | 68.82 | 6.86 | 18.12 |
| 9 | 40 | 50 | 72 | 33.34 | 6.25 | 10.96 | 69.00 | 6.81 | 19.54 | 65.08 | 6.76 | 20.32 |

Контрольний зразок (немодифікований дуб, вологість W=10 %): L = 70.8, a = 8.21, b = 22.51

Значення ΔE на поверхні та в середині модифікованих зразків дуба

| № зразка | Температура, $t, ^\circ\text{C}$ | Вологість, $W, \%$ | Час, $\tau, \text{год}$ | ΔE | ΔE | ΔE |
|----------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | | На поверхні $x=0 \text{ мм}$ | На глибині $x=7 \text{ мм}$ | На глибині $x=0 \text{ мм}$ |
| 1 | 30 | 50 | 24 | 37.29 | 3.31 | 3.28 |
| 2 | 30 | 50 | 48 | 35.87 | 28.80 | 22.17 |
| 3 | 30 | 50 | 72 | 41.30 | 34.03 | 33.47 |
| 4 | 40 | 25 | 24 | 42.04 | 2.52 | 0.92 |
| 5 | 40 | 25 | 48 | 38.49 | 0.19 | 1.11 |
| 6 | 40 | 25 | 72 | 38.43 | 1.81 | 1.97 |
| 7 | 40 | 50 | 24 | 38.14 | 36.32 | 5.24 |
| 8 | 40 | 50 | 48 | 37.82 | 4.71 | 5.00 |
| 9 | 40 | 50 | 72 | 39.24 | 3.74 | 6.29 |

ΔE на поверхні $x=0 \text{ мм}$ має високе значення (37–42), що відповідає темно-коричневому кольору після модифікації.

ΔE на глибині $x=7 \text{ мм}$

- за температури $t=30 \text{ }^\circ\text{C}$ зростає з часом (поступове проникнення кольору),
- за температури $t=40 \text{ }^\circ\text{C}$ різниця різко залежить від вологості:
 - $W=25 \%$ $\rightarrow \Delta E \approx 2 \dots 3$ (колір майже не проник),
 - $W=50 \%$ $\rightarrow \Delta E$ від 4 до 36 (активне потемніння внутрішніх шарів).

ΔE на глибині $x=10 \text{ мм}$ показує, що:

- глибше $x=10 \text{ мм}$ при $W=25 \%$ вологості реакція майже не проходить,
- за вологості $W=50 \%$ і високій температурі потемніння проникає глибоко,
- у зразку №9 глибина зміни кольору значна ($\Delta E \approx 6.29$).

Висновки до розділу 3

У результаті проведених експериментальних досліджень зміни кольору деревини дуба під дією парів аміаку встановлено такі закономірності та особливості процесу аміачної модифікації.

1. Усі модифіковані зразки продемонстрували суттєве зниження показника L^* (освітленості) на поверхні — до рівня 31–36, порівняно з контролем ($L = 70,8$), що свідчить про значну інтенсивність потемніння та формування характерного темно-коричневого відтінку.
2. Зміна кольору за ΔE для всіх зразків на поверхні перевищує 35 одиниць, що відноситься до категорії «дуже сильна зміна кольору». Максимальні значення спостерігалися при режимі $t=30\text{ }^\circ\text{C} / \tau=72\text{ год}$ ($\Delta E = 41,30$) та $t=40\text{ }^\circ\text{C} / W=25\text{ \%} / \tau=24\text{ год}$ ($\Delta E = 42,04$).
3. Температура є одним із ключових чинників, що визначають інтенсивність і глибину забарвлення. За $t=40\text{ }^\circ\text{C}$ реакції аміаку з дубильними речовинами, танінами та продуктами окиснення лігніну протікають значно швидше, що підтверджується різким зменшенням L^* і збільшенням ΔE у порівнянні з режимом $t=30\text{ }^\circ\text{C}$.
4. Вологість дубової деревини відіграє вирішальну роль у процесі модифікації.
 - при вологості $W=25\text{ \%}$ аміак проникає переважно у поверхневі шари (до $x=4\text{--}9\text{ мм}$ з площини), а ΔE на глибинах $x=7\text{--}10\text{ мм}$ залишається низьким ($0,19\text{--}2,52$);
 - за вологості $W=50\text{ \%}$ відбувається суттєво глибше проникнення аміаку, ΔE зростає у 5–15 разів, а у зразку №9 спостерігається майже повне забарвлення всієї товщини (25 мм).
5. Тривалість обробки визначає ступінь рівномірності та глибини забарвлення.

- після $\tau=24$ годин колірні зміни виражені лише на поверхні;
 - після $\tau=48$ год починає темніти серцевина;
 - після $\tau=72$ год за $t=40$ °C і вологості $W=50$ % фіксується максимальний ефект, коли всі колірні показники на глибині наближаються до поверхні.
6. Аналіз значень L^* , a^* , b^* у глибині матеріалу ($x=7$ та 10 мм) підтверджує, що збільшення вологості з $W=25$ % до $W=50$ % у поєднанні з підвищенням температури вдвічі збільшує ефективність проникнення аміаку. У зразках з $W=25$ % вологістю L^* у глибині залишається близькою до контрольної (68–71), тоді як при $W=50$ % — зменшується до 65,08 (зразок №9).
7. Глибина проникнення кольору з площини та з торця підтверджує напрямну дифузії аміаку вздовж волокон.
- Максимальні значення:
- при $t=30$ °C: 9 мм (площина), 13 мм (торець);
 - при $t=40$ °C / $W=25$ %: до 9 мм і 16 мм відповідно;
 - при $t=40$ °C / $W=50$ %: майже повне проникнення (25 мм), що демонструє значно більшу провідність вологого дуба.
8. Найвищу інтенсивність та однорідність забарвлення продемонстрував режим: $t=40$ °C, $W=50$ % вологості, $\tau=72$ години, який забезпечив найкращу реакцію між аміаком і дубильними речовинами та найнижчі значення L^* по всій товщині.
9. Отримані результати повністю узгоджуються з науковими даними інших авторів (Weigl et al., 2012; Doczekalska et al., 2024; Stachowiak-Wencek et al., 2020), які також підтверджують, що підвищена вологість і температура визначають швидкість аміачної модифікації деревини та глибину дифузії реагента. Це свідчить про закономірність процесу незалежно від породи та географічного походження деревини.

10. У технологічному плані встановлено, що для досягнення бажаного декоративного ефекту темного дуба найдоцільнішими є режими із підвищеною вологістю заготовки та температурою обробки, оскільки вони забезпечують як високу інтенсивність, так і рівномірність забарвлення, що є критичним параметром у меблевому та інтер'єрному виробництві.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1. Характеристика небезпечних властивостей аміаку

Аміак (NH_3) — це безбарвний газ із різким характерним запахом, добре розчинний у воді з утворенням аміачної води (NH_4OH). У промисловості аміак широко застосовується як хімічний реагент, але належить до небезпечних та токсичних речовин, що вимагає суворого дотримання правил безпеки.

Основні небезпечні властивості аміаку:

- Токсичність. Пари аміаку подразнюють слизові оболонки очей, дихальних шляхів, шкіру. Гранично допустима концентрація (ГДК) аміаку в повітрі робочої зони становить 20 мг/м³.
- Хімічна активність. Аміак вступає в реакцію з кислотами, окисниками, утворюючи вибухонебезпечні сполуки.
- Вибухонебезпечність. У суміші з повітрям у концентрації 16–25% аміак може вибухати при наявності джерела запалювання.
- Задущлива дія. При концентраціях понад 0,5% об'єму повітря може спричинити зупинку дихання та серцеву недостатність.
- Кристалізація при охолодженні. При низьких температурах аміак переходить у рідкий стан, створюючи підвищений тиск у герметичних системах.

Тому при проведенні експериментів із використанням аміаку необхідно дотримуватись заходів техніки безпеки.

4.2. Засоби індивідуального захисту та вентиляція

Для забезпечення безпечних умов праці в лабораторії передбачено використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), а також відповідної вентиляційної системи.

До основних засобів індивідуального захисту належать:

- фільтрувальні протигази типу КД або КДФ (призначені для захисту від парів аміаку);
- захисні окуляри або герметичні маски для запобігання подразненню очей;
- гумові рукавички та кислотостійкі халати;
- взуття з нековзною підошвою, яке не поглинає хімічні речовини.

Робоче місце має бути обладнане місцевою витяжною вентиляцією з регульованим потоком повітря, що забезпечує швидке видалення парів аміаку. Рекомендований кратність повітрообміну в лабораторному приміщенні — не менше 12 обмінів/год.

Перед початком роботи необхідно перевіряти:

- справність вентиляції;
- герметичність камер;
- відсутність запаху аміаку у приміщенні.

При появі запаху слід негайно припинити роботу, відкрити вікна, увімкнути витяжку та повідомити керівника лабораторії.

4.3. Організація безпечної роботи з герметичними камерами

Герметична металева камера, що використовується для модифікації деревини аміаком, повинна мати конструкцію, що забезпечує:

- надійну герметизацію стиків і клапанів;
- можливість контролю внутрішнього тиску (манометр або запобіжний клапан);
- контроль температури всередині камери за допомогою термодатчика або термопари;
- захисний кожух для уникнення контакту з гарячими поверхнями.

Основні правила експлуатації камери:

1. Перед завантаженням деревини камера повинна бути сухою і перевіреною на герметичність.
2. Заборонено відкривати камеру, якщо в ній утримується надлишковий тиск.
3. Внесення аміаку проводиться лише після повного закриття всіх клапанів.
4. Під час нагрівання температура має контролюватися автоматично, не перевищуючи 50 °С.
5. Відкривати камеру дозволяється тільки після охолодження і провітрювання приміщення.

Під час експериментів у приміщенні повинен бути резервний балон із нейтралізатором (розчин оцтової кислоти 5%), який використовується для поглинання парів аміаку після завершення роботи.

4.4. Пожежна безпека та дії у випадку аварійних ситуацій

Аміак не є горючим газом, проте в суміші з повітрям може вибухати при контакті з відкритим вогнем або іскрою. Для запобігання аваріям слід дотримуватись таких правил пожежної безпеки:

- заборонено використовувати відкритий вогонь, іскрогенеруюче обладнання або курити біля місця проведення експерименту;
- камера і нагрівальні елементи повинні мати заземлення;
- поруч має знаходитись вогнегасник типу ВВК-2 або ВВК-5 (вуглекислотний);
- усі працівники мають бути ознайомлені з планом евакуації та інструкцією з ліквідації аварійних ситуацій.

У випадку витоку аміаку необхідно:

1. негайно покинути приміщення та попередити інших працівників.
2. увімкнути аварійну вентиляцію.

3. Провести нейтралізацію парів аміаку розпиленням 5% розчину оцтової або лимонної кислоти.
4. Постраждалого вивести на свіже повітря, забезпечити спокій, при потребі — викликати медичну допомогу.

У разі пожежі:

- вимкнути електроживлення;
- не використовувати воду для гасіння аміаку;
- застосовувати вуглекислотний або порошковий вогнегасник.

Висновки до розділу 4

1. Аміак є токсичною, вибухонебезпечною речовиною, тому всі експерименти з його використанням мають проводитись лише у спеціально обладнаних приміщеннях із примусовою вентиляцією.
2. Застосування засобів індивідуального захисту — обов'язкова умова роботи з аміаком.
3. Герметична камера повинна мати систему контролю тиску та температури, запобіжний клапан і можливість безпечного розгерметизування.
4. Дотримання правил техніки безпеки, охорони праці та пожежної безпеки гарантує безпечне виконання досліджень і збереження здоров'я персоналу.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено комплексне теоретичне та експериментальне дослідження зміни кольору деревини дуба в процесі модифікування парами аміаку з урахуванням впливу температури, вологості та часу витримки. На основі отриманих результатів сформульовано такі основні висновки.

1. Теоретичний аналіз технологій аміачної модифікації встановив:

Модифікація деревини аміаком є ефективним методом зміни кольору, декоративних властивостей та часткових змін фізико-хімічних характеристик дуба.

Основою зміни кольору є реакції між аміаком та дубильними речовинами (танінами), а також продуктами окиснення лігніну.

Згідно з дослідженнями Schuerch (1971), Weigl et al. (2012), Doczekalska et al. (2024), Stachowiak-Wencsek et al. (2020), аміак викликає потемніння деревини внаслідок утворення стабільних темно-коричневих комплексів.

На процес забарвлення значно впливають:

- вологість деревини (визначає швидкість дифузії газоподібного NH_3),
- температура (підсилює реакційну здатність аміаку та дубильних речовин),
- тривалість витримки,
- напрям руху реагенту (вздовж волокон проникнення значно швидше).

Аналіз літератури показав, що дуб та бук є породами, найбільш чутливими до аміачної модифікації, що підтверджено результатами різних авторів.

2. Експериментальна методика була розроблена та реалізована відповідно до вимог СІЕ Lab* і повністю відповідає дослідницьким стандартам:

- використано дубові заготовки $150 \times 400 \times 30$ мм;
- вологість зразків становила $W=25\%$ та $W=50\%$;

- у досліджах застосовано водний розчин аміаку (25% NH₃);
- концентрація NH₃ у камері була розрахована відповідно до хімічних закономірностей;
- вимірювання кольору виконано спектрофотометром за системою CIE Lab*;
- для порівняння застосовано немодифікований контрольний зразок.

3. Експериментально встановлено особливості зміни кольору дуба:

3.1. Зміни на поверхні

- Значення L* після модифікації зменшилися з 70,8 до 31–36, що свідчить про інтенсивне потемніння.
- ΔE на поверхні у всіх зразків становило 35–42, що класифікується як дуже сильна зміна кольору.

3.2. Вплив температури

- Підвищення температури від t=30 до t=40 °C прискорило реакції та збільшило рівномірність забарвлення.
- При t=40 °C кольорові зміни були глибшими та стабільнішими.

3.3. Вплив вологості

- При W=25 % вологості аміак практично не проникає в глибину (ΔE на 7–10 мм ≈ 0,2–2,5).
- При W=50 % вологості ΔE на глибині зростає до 15–36, забарвлення поширюється на більшу частину товщини.
- Мокріша деревина забезпечує кращу дифузю аміаку через насичення клітинних стінок.

3.4. Вплив часу витримки

- τ =24 год → забарвлення поверхневе;

- $\tau = 48$ год \rightarrow забарвлення проникає в середні шари;
- $\tau = 72$ год \rightarrow за вологості $W = 40\%$ і $W = 50\%$ вологості досягається максимальна однорідність кольору.

3.5. Глибина проникнення кольору

- $t = 30\text{ }^\circ\text{C}$: $x = 6\text{--}9$ мм з площини, $x = 9\text{--}13$ мм з торця;
- $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ / $W = 25\%$: до $x = 9$ мм з площини, $x = 16$ мм з торця;
- $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ / $W = 50\%$: майже повне забарвлення — $x = 25$ мм товщини.

Це відповідає даним літератури щодо того, що аміак поширюється швидше вздовж волокон та в умовах підвищеної вологості.

4. Найефективніший режим модифікування, встановлений експериментально:

Температура $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$, вологість зразка $W = 50\%$, тривалість обробки $\tau = 72$ год

Цей режим забезпечує:

- максимальне потемніння поверхні,
- найнижче значення L^* по всій товщині,
- практично повне та рівномірне забарвлення зразка,
- стабільний темно-коричневий колір без контрастів,
- найвищий ΔE у всіх точках вимірювання.

5. Практичні висновки

1. Для декоративного тонування дуба аміаком рекомендується застосовувати підвищену температуру та вологість.
2. Зразки з низькою вологістю не підходять для глибокої модифікації — вони забарвлюються лише поверхнево.
3. Для меблевої та інтер'єрної продукції оптимальним є режим $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ / $W = 50\%$ / $\tau = 72$ год, який забезпечує:

- максимальну естетичність
 - природний колір, типовий для «fumigated oak»
 - стабільний відтінок по всій товщині
 - відсутність зон нерівномірного забарвлення.
4. Отримані результати можуть використовуватися як база для технологічних карт і стандартизації процесів аміачної модифікації дуба.

6. Висновок

Поставлена мета дослідження — встановити закономірності зміни кольору дуба під дією аміаку та визначити оптимальні режими модифікації — повністю досягнута. Отримані результати підтверджені розрахунками, вимірюваннями та узгоджуються з даними провідних дослідників у галузі хімічної модифікації деревини.

Робота має практичне значення для:

- деревообробних підприємств,
- виробників меблів,
- декоративної обробки цінних порід,
- створення технологій «natural dark oak» без використання морилок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вінтонів І. С., Сопушинський І. М., Тайшінгер А. *Деревинознавство: навчальний посібник*. – 2-ге вид., доповн. – Львів: Априорі, 2007. – 321 с.
2. Бондаренко І. В., Пилипенко А. П. Зміна кольору деревини при термохімічній обробці // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2018. – Вип. 28(5). – С. 92–98. – DOI: 10.15421/40280519.
3. Левицький В. М., Коренчук О. М. Технологічні аспекти модифікації деревини аміаком // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – 2020. – № 3. – С. 54–59. – DOI: 10.20998/2413-4295.2020.03.08.
4. Чопенко Н. Ф., Кійко О. А., Кушпіт А. С. *Методичні вказівки: застосування методів статистичного аналізу в деревообробленні. Частина II*. – Львів: УкрДЛТУ, каф. Технології виробів з деревини, 2004. – 32 с.
5. ДСТУ 2293:2019. Система стандартів безпеки праці. Речовини шкідливі. Загальні вимоги до безпеки та методів контролю. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 24 с.
6. Čermák P., Dejmál A. The effect of heat and ammonia treatment on colour response of oak wood (*Quercus robur*) and comparison of some physical and mechanical properties // *Maderas. Ciencia y Tecnología*. – 2013. – Vol. 15, No. 3. – P. 375–389. – DOI: 10.4067/S0718-221X2013005000029.
7. Miklečić J., Španić N., Jirouš-Rajković V. Wood color changes by ammonia fuming // *BioResources*. – 2012. – Vol. 7, No. 3. – P. 3767–3778. – URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/wood-color-changes-by-ammonia-fuming>.
8. Stachowiak-Wencek A., Bartkowiak M., Zborowska M., Bocianowski J. Effects of aqueous ammonia vapor on the color and chemical structure of *Robinia pseudoacacia* and oak woods // *BioResources*. – 2020. – Vol. 15, No. 3. – P. 5812–5828. – DOI: 10.15376/biores.15.3.5812-5828.
9. Machová D., Baar J., Paschová Z., Hýsek Š. Color changes and accelerated ageing in oak wood treated with ammonia gas and

- iron nanoparticles // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2019. – Vol. 77. – P. 705–716. – DOI: 10.1007/s00107-019-01406-x.
10. Hackenberg H., Wimmer R., Pöckl M., et al. Alteration of bending properties of wood due to ammonia treatment and additional densification // *Forests*. – 2021. – Vol. 12, No. 8. – Article 1110. – DOI: 10.3390/f12081110.
11. Schuerch C. Plasticizing wood with ammonia: Control of color change // *Journal of Polymer Science: Part C*. – 1971. – Vol. 36, No. 1. – P. 111–123. – DOI: 10.1002/polc.5070360116.
12. Effect of Ammonia Fumigation Treatment on Wood Color and Chemical Composition. *International Journal of Polymer Science*. – 2021. – Article ID 5550800. – DOI: 10.1155/2021/5550800
13. Weigl M., Müller U., Wimmer R., Hansmann C. Ammonia vs. thermally modified timber – comparison of physical and mechanical properties // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2012. – Vol. 70, No. 2. – P. 233–239. – DOI: 10.1007/s00107-011-0542-3.
14. Doczekalska B., Moliński W., Borówka M., Prądyński W., Olek W. Thermochemical modification of beech wood with gaseous ammonia combined with wood compaction // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2024. – Online first. – DOI: 10.1007/s00107-023-01992-x.
15. Stanciu M. D., Sova D., Savin A., Ilias N., Gorbacheva G. A. Physical and mechanical properties of ammonia-treated black locust wood // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, No. 2. – Article 377. – DOI: 10.3390/polym12020377.
16. Schuerch C. Plasticizing wood with ammonia — control of color change // *Journal of Polymer Science: Part C*. – 1971. – Vol. 36, No. 1. – P. 231–239. – DOI: 10.1002/polc.5070360126.

Интернет ресурсы

17. <https://search.library.wisc.edu/digital/ASRPT6Q2GVCH3M8J>

18. <https://search.library.wisc.edu/digital/ASS7KO5KLYFBLN8U>
19. https://www.researchgate.net/figure/Colour-change-of-oak-wood-due-to-ammoniation-left-reference-right-ammoniated_fig1_235767201
20. <https://www.homepreservationmanual.com/wood-fuming-aka-smoking/>
21. https://www.aslitesting.com/?campaignid=7819767099&adgroupid=81127330069&keyword=environmental%20test%20chambers&feeditemid=&targetid=kwd-305444293321&loc_physical_ms=9208908&matchtype=p&placement=&gad_source=1&gad_campaignid=7819767099&gbraid=0AAAAACmfRz-jKgZx2l-RRslGkTVzYlgKf&gclid=Cj0KCQjwmYzIBhC6ARIsAHA3IkRW-5U8_U-a6KVk2n8oZWC1eHtuLOdvvH1pp8TsQjEcu_PhMS1F7jcaAIFzEALw_wcB



«Зміни колірних характеристик дубових заготовок у процесі модифікування аміаком»

Виконав:

ст. гр. ДМТ-62м

Трубка С.В.

Керівник роботи:

к.т.н., доц. Губер Ю. М.

Процес обробки деревини аміаком (також відомий як копчення або чорніння) деревини – це техніка, яка використовується вже понад 50 років, гарантуючи матеріал високої міцності та безпеки.

Ця техніка виникла завдяки випадковому відкриттю в Англії, де дубові дошки, що зберігалися в стайні, почали темніти через вплив аміачних парів з кінської сечі. Відтоді цей процес називають аміакуванням.

Перші ґрунтовні наукові дослідження проводилися у кінці 1960-х – початку 1970-х років: У Латвійському інституті хімії під керівництвом [Калніньша А.Й.](#) проводилися дослідження впливу 25%-го водного розчину аміаку на деревину ([1967 рік](#)) з метою покращення фізико-механічних властивостей (ущільнення та згинання).

[Miklós Bariska](#) (Швейцарський федеральний технологічний інститут -ETH Zurich) у [1969 році](#) опублікував статтю «Plasticization of the wood with ammonia in theory and practice». Його дослідження 1975 року «Collapse phenomena in beechwood during and after NH₃-impregnation» стало важливим внеском у розуміння фізико-хімічних змін деревини після обробки безводним аміаком.

[W. Oniśko and M. Matejak](#) (Варшавський університет природничих наук SGGW - Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego) також досліджували вплив розчину аміаку на механічні властивості деревини берези ([1970 рік](#)).

Переваги модифікування деревини аміаком

- **Підвищення твердості деревини:** обробка зміцнює структуру матеріалу.
- **Унікальний колір:** Ефект чорніння надає деревині ексклюзивного відтінку чорного дерева.
- **Натуральний вигляд:** Деревина зберігає свою текстуру, підкреслюючи свій природний характер.
- **Довговічність покриття:** обробка дозволяє багаторазове шліфування без втрати естетичної цінності.
- **Стійкість до ультрафіолетового випромінювання:** копчена деревина забезпечує кращий захист від сонячного випромінювання.

Деревина, що пройшла процес обробки аміаком, використовується у виробництві:

- Сходи
- Паркетні підлоги
- Декоративні ламелі
- Стільниці
- Столи
- Підвіконня
- Тераси
- Меблі



Аміак можна привести в контакт з деревиною різними методами.

По-перше, можливе просочення в рідкому безводному аміаку . Аміак необхідно охолодити до $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ за нормального тиску або зберігати в посудині під тиском, щоб отримати рідкий стан.

По-друге, також можлива пластифікація аміаком у газовій атмосфері .

Останнім методом пластифікації є просочення водним розчином аміаку.

Метод, який використовується в цьому дослідженні, - це пластифікація в газовій атмосфері майже при насиченому тиску пари для запобігання ефектам конденсації. Важливими перевагами газової обробки є здатність впливати на інтенсивність обробки за допомогою тиску та температури.

Технологія системи обмежена автоклавом з контрольованою температурою.

Це також відносно швидкий процес, оскільки аміак є газоподібним, має дуже малі молекули та дуже швидко насичує зразок деревини.

Метою цього дослідження було виявити зміни колірних характеристик деревини дуба (*Quercus robur*) залежно від технологічних параметрів обробки: вологості деревини, температури та тривалості процесу модифікування.

Лабораторна установка для модифікування деревини дуба аміаком.

Експериментальна установка складається з металевої камери циліндричної форми діаметром 400 мм і висотою 600 мм. Загальний об'єм становить – 75,4 літри

У нижній частині камери розташовано піддон із 200 мл водного розчину аміаку (25 %), над яким на решітці встановлювалися дубові заготовки.

Камера нагрівалася за допомогою зовнішнього електричного термоконтролера, що підтримував температуру 30 ± 1 °C або 40 ± 1 °C залежно від серії дослідів.

Установка оснащена запобіжним клапаном тиску, який забезпечував робочий надлишковий тиск не більше 0,02 кПа, що відповідає умовам безпечного проведення експериментів



Вимірювальне обладнання

MERLIN HM9-WS1 – професійний портативний прилад для вимірювання вологості деревини та шпону неруйнівним методом.



X-Rite eXact - професійний портативний спектроденситометр для точного контролю кольору в поліграфії та інших галузях. Використовувався для вимірювання кольору за системою CIE L*a*b* на поверхні і на глибині зразків.



Визначення концентрації аміаку в камері обробки

Еквівалентна маса NH_3 (стехіометрія «35 г $\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow 17$ г NH_3 »): $X=35/17$ 53,5г = 26,0 г NH_3 . (2.1)

Максимально доступна маса аміаку, що може виділитися з 200 мл 25 % NH_4OH , становить ≈ 26 г NH_3 .

Кількість речовини NH_3 : $n_{\text{NH}_3} = 26/17 = 1,529$ моль. (2.2)

Початкова кількість речовини повітря в камері

Оцінимо число молів повітря (до внесення аміаку) через рівняння стану ідеального газу:

$$n_{\text{пов}} = \frac{pV}{RT} \quad (2.3)$$

За температури **30 °C (303 K):**

$$n_{\text{пов}} = \frac{10325 \times 0,07536}{8,314 \times 303} \approx 3,04 \text{ моль} \quad (2.4)$$

За температури **40 °C (313 K):**

$$n_{\text{пов}} = \frac{10325 \times 0,07536}{8,314 \times 313} \approx 2,94 \text{ моль} \quad (2.5)$$

Маса повітря:

$$m_{\text{пов}} = n_{\text{пов}} \cdot M_{\text{пов}} (\approx 3,0 \cdot 29,5 \approx 88-90 \text{ г.}) \quad (2.6)$$

Масова частка NH_3 відносно маси повітря в камері

$$w_{\text{NH}_3} = \frac{\{m_{\text{NH}_3}\}}{\{m_{\text{NH}_3} + m_{\text{пов}}\}} = \frac{\{26\}}{\{26 + 89\}} \approx 0,226 \approx 22,6\% \text{ за масою} \quad (2.7)$$

Змінні параметри модифікування дубових зразків:

1. Абсолютна вологість деревини дуба: $W=25\%$, $W=50\%$
2. Температура обробки: $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. Тривалість обробки: $\tau=24\text{ год}$ $\tau=48\text{ год}$ $\tau=72\text{ год}$

Після модифікування зразки розпилювалися за товщиною на пластини та витримувалися у атмосферних умовах до досягнення вологості 12-14%

Колірні характеристики вимірювали за системою CIE L*a*b*

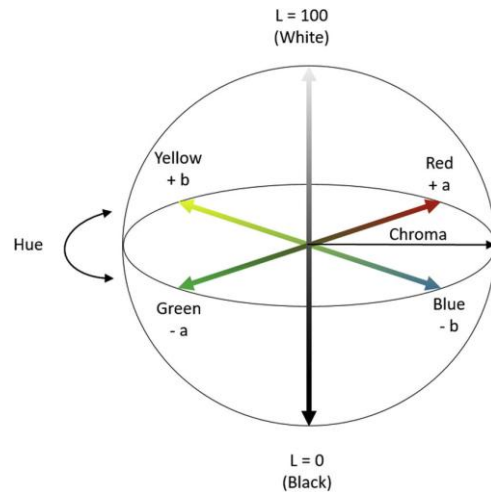
на поверхні та глибині $x=7$ мм, 10мм ,

де

L^* — світлота (яскравість),

a^* — координата «зелений-червоний»,

b^* — координата «синій-жовтий».



Загальну різницю кольору визначали за формулою:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$



Значення L, a, b на різній глибині модифікованих зразків дуба

| № зразка | T, °C | W, % | Час, год | На поверхні взірця | | | ΔE | На глибині 7 мм | | | ΔE | На глибині 10 мм | | | ΔE |
|----------|-------|------|----------|--------------------|------|-------|-------|-----------------|------|-------|-------|------------------|------|-------|-------|
| | | | | L* | a* | b* | | L* | a* | b* | | L* | a* | b* | |
| 1 | 30 | 50 | 24 | 35.35 | 6.17 | 11.19 | 37.29 | 70.40 | 6.97 | 19.47 | 3.31 | 72.27 | 7.21 | 19.75 | 3.28 |
| 2 | 30 | 50 | 48 | 36.89 | 5.80 | 11.10 | 35.87 | 44.24 | 5.15 | 11.79 | 28.80 | 50.43 | 4.25 | 14.69 | 22.17 |
| 3 | 30 | 50 | 72 | 31.5 | 5.85 | 9.80 | 41.30 | 38.99 | 5.11 | 10.80 | 34.03 | 39.85 | 4.69 | 10.27 | 33.47 |
| 4 | 40 | 25 | 24 | 31.55 | 4.00 | 8.09 | 42.04 | 68.38 | 8.05 | 21.83 | 2.52 | 70.00 | 7.87 | 22.19 | 0.92 |
| 5 | 40 | 25 | 48 | 35.27 | 4.18 | 8.28 | 38.49 | 70.79 | 8.03 | 22.44 | 0.19 | 71.03 | 7.83 | 21.49 | 1.11 |
| 6 | 40 | 25 | 72 | 34.58 | 4.92 | 10.06 | 38.43 | 69.23 | 8.46 | 21.64 | 1.81 | 68.90 | 8.32 | 22.00 | 1.97 |
| 7 | 40 | 50 | 24 | 34.61 | 6.15 | 10.65 | 38.14 | 34.85 | 6.88 | 17.84 | 36.32 | 69.31 | 6.89 | 17.66 | 5.24 |
| 8 | 40 | 50 | 48 | 34.99 | 5.79 | 10.63 | 37.82 | 67.90 | 6.78 | 19.08 | 4.71 | 68.82 | 6.86 | 18.12 | 5.00 |
| 9 | 40 | 50 | 72 | 33.34 | 6.25 | 10.96 | 39.24 | 69.00 | 6.81 | 19.54 | 3.74 | 65.08 | 6.76 | 20.32 | 6.29 |

Контрольний зразок (немодифікований дуб, вологість W=10 % :

L = 70.8, a = 8.21, b* = 22.51

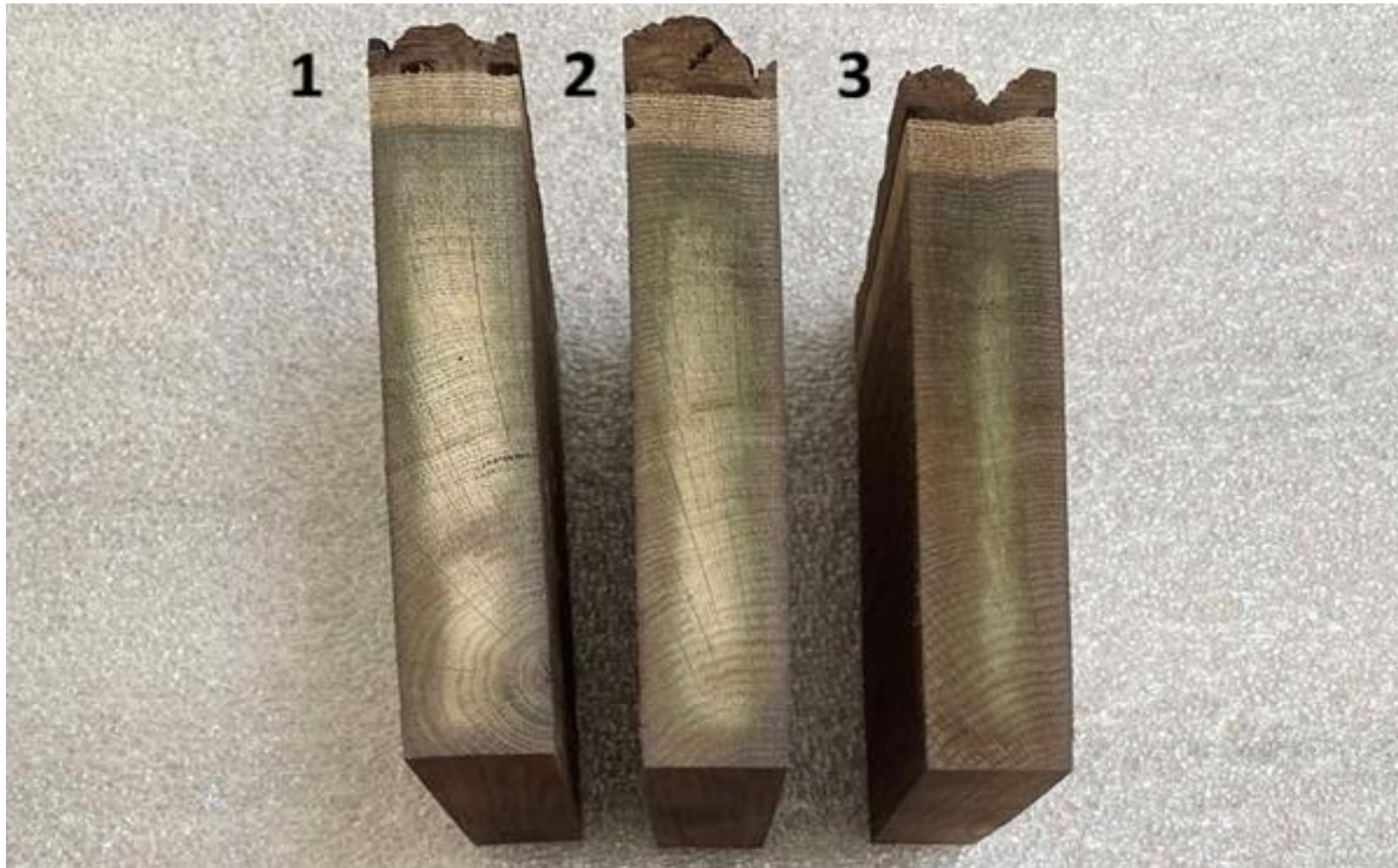
Фотофіксація результатів модифікування взірців за різної температури, вологості та часу витримки



Зміна кольору взірців на поверхні за температури $t=40^{\circ}\text{C}$, вологості $W=50\%$ та тривалості обробки 1 – $\tau=24$ год.; 2 – $\tau=48$ год.; 3 – $\tau=72$ год.



Глибина проникнення кольору за температури $t=40^{\circ}\text{C}$, вологості $W=50\%$ та тривалості обробки: 1 – $\tau = 24$ год.; 2 – $\tau = 48$ год.; 3 – $\tau = 72$ год.

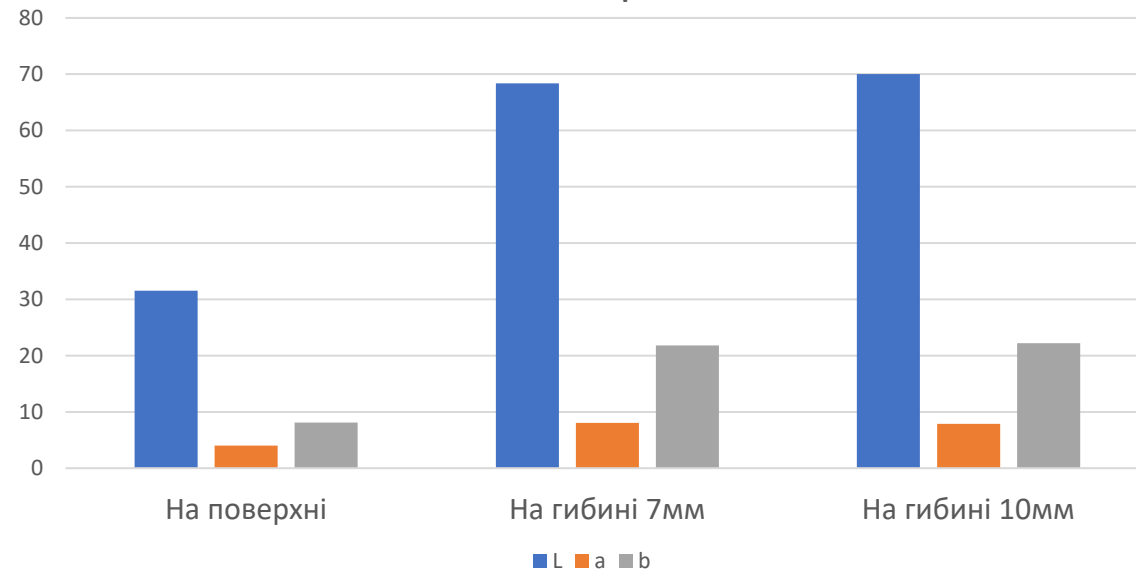


Глибина проникнення кольору за температури $t=40^{\circ}\text{C}$, вологості $W=25\%$ та тривалості обробки: 1 – $\tau=24$ год.; 2 – $\tau=48$ год.; 3 – $\tau=72$ год.



Взірець 4 – $t = 40^{\circ}\text{C}$ $W = 25\%$ час витримки - 24 години

Показники L a b на різних глибинах



Поверхня – Темний рівномірний колір, але менша насиченість.

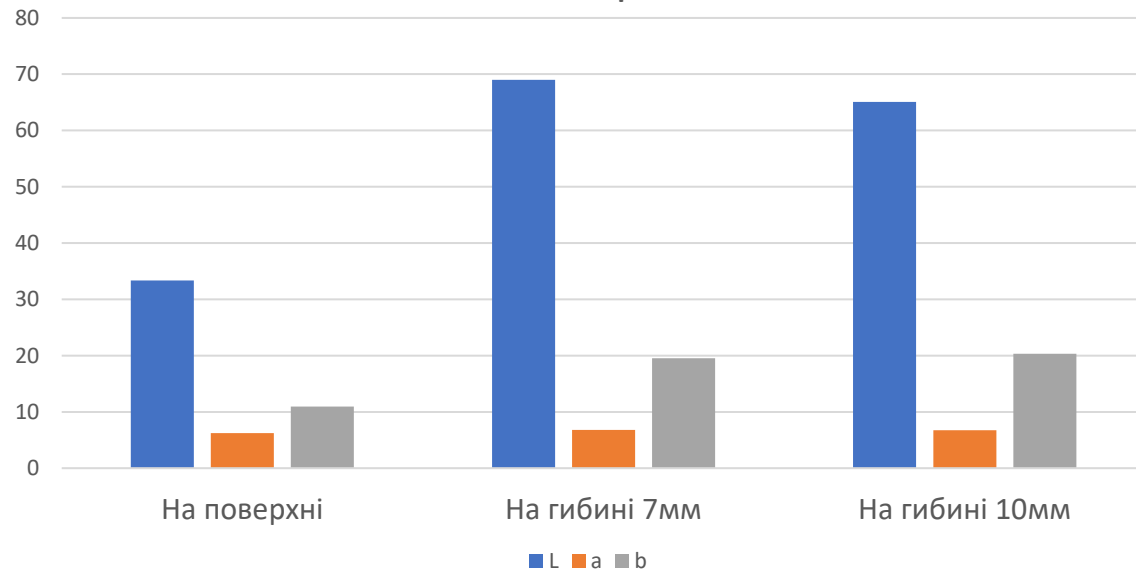
Глибина проникнення:

- 4мм з площини
- 10м з торця

Вплив температури відчутний, але низька вологість обмежує реакцію. У середині зразка колір практично не змінений.

Взірець 9 – $t=40^{\circ}\text{C}$ $W=50\%$ час витримки 72 години

Показники L a b на різних глибинах



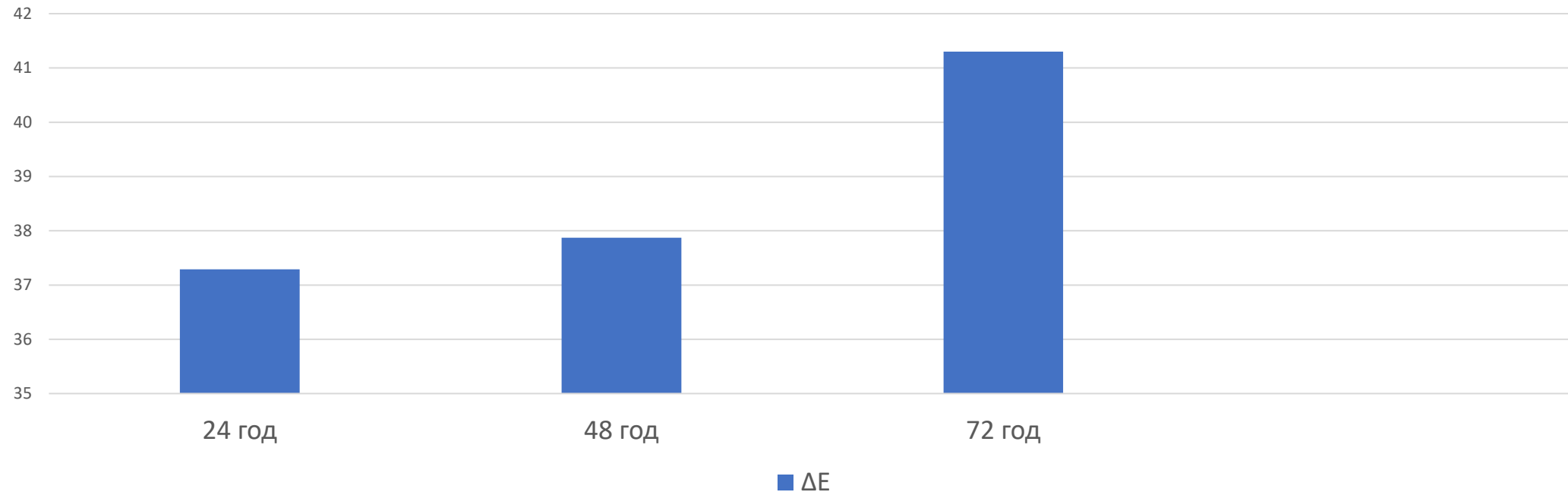
Поверхня – Дуже темний рівномірний колір

Глибина проникнення:

- 12мм з площини
- 20мм з торця

Глибоке проникнення кольору.

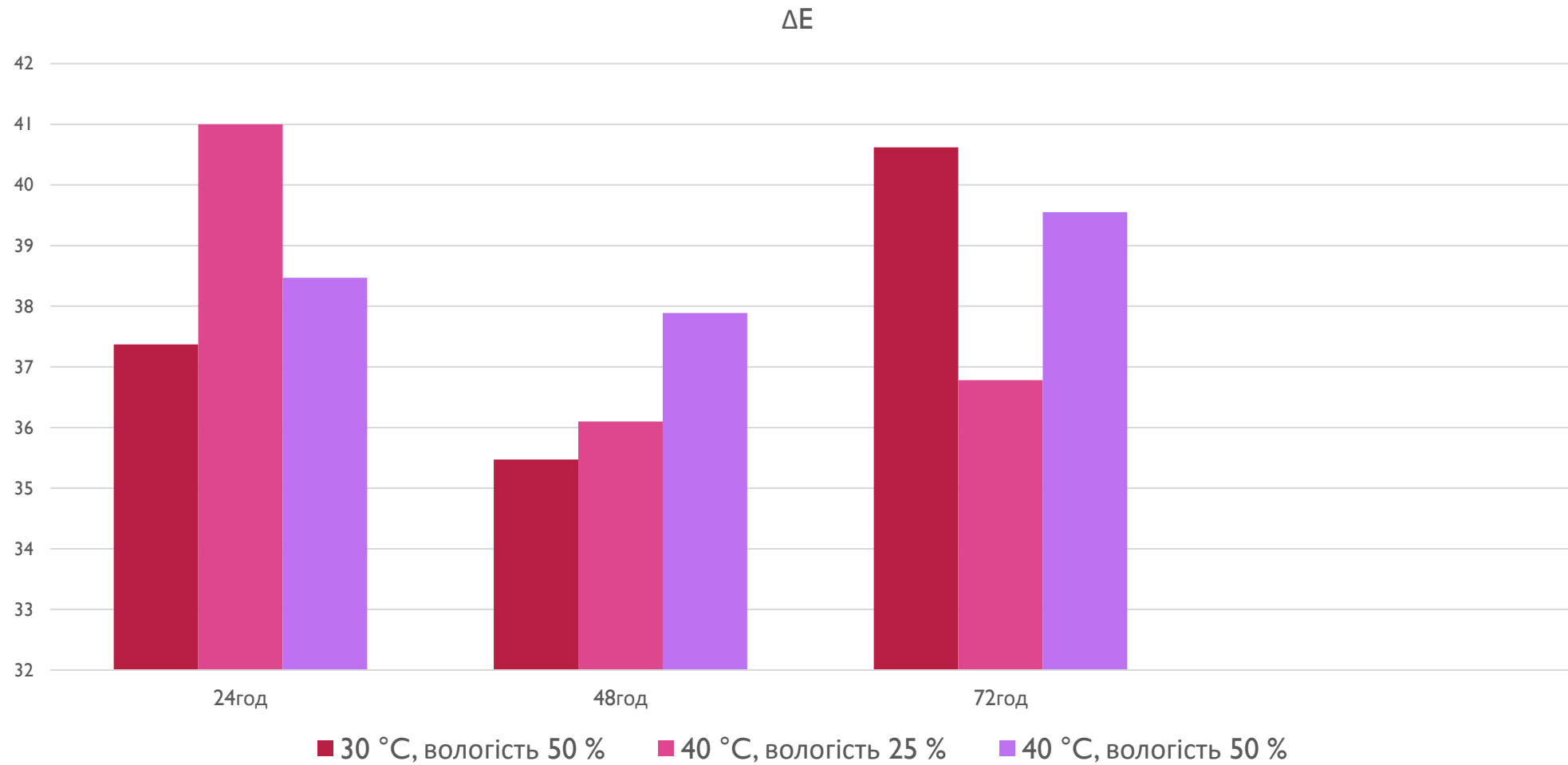
Значення ΔE для зрізків 7, 8, 9 $t = 40^\circ\text{C}$ $W=50\%$ 24, 48, 72 год



- Усі три зразки мають $\Delta E > 35$, що класифікується як дуже сильна зміна кольору.
- Значення ΔE зростає зі збільшенням часу витримки, що свідчить про прогресивне потемніння та стабілізацію кольору.
- Найвище ΔE демонструє зразок №9 (72 години), що відповідає максимальному проникненню забарвлення глибиною майже 30 мм.

Графік підтверджує, що саме ці три зразки є найбільш вдалими з точки зору як глибини, так і насиченості кольору.

Зміни кольору ΔE за різної температури обробки та вологості дубових зразків



У ЄС немає загальної заборони на використання хімічно обробленої деревини. Забороняються лише конкретні небезпечні речовини, які застосовувалися для просочення чи захисту деревини. Це регулюється через **Регламент REACH (№1907/2006)**, що встановлює перелік хімікатів, які не можна використовувати або дозволено лише з обмеженнями.

Аміак не входить до списку заборонених речовин для деревини, проте класифікується як небезпечна речовина (корозійна, токсична при вдиханні у високих концентраціях). Тому будь-яке промислове використання аміаку для модифікації деревини має відповідати вимогам безпеки, охорони праці та екологічних норм.

Основні небезпечні властивості аміаку:

- **Токсичність.** Пари аміаку подразнюють слизові оболонки очей, дихальних шляхів, шкіру. Гранично допустима концентрація (ГДК) аміаку в повітрі робочої зони становить 20 мг/м³.
- **Хімічна активність.** Аміак вступає в реакцію з кислотами, окисниками, утворюючи вибухонебезпечні сполуки.
- **Вибухонебезпечність.** У суміші з повітрям у концентрації 16–25% аміак може вибухати при наявності джерела запалювання.
- **Задушлива дія.** При концентраціях понад 0,5% об'єму повітря може спричинити зупинку дихання та серцеву недостатність.
- **Кристалізація при охолодженні.** При низьких температурах аміак переходить у рідкий стан, створюючи підвищений тиск у герметичних системах.

Висновки

- Аміачна модифікація дуба викликає інтенсивне та стабільне потемніння, що формується внаслідок реакції аміаку з дубильними речовинами та фенольними компонентами деревини.
- Виявлено суттєвий вплив вологості, температури та часу витримки на характер і глибину забарвлення.
- Найбільший ефект дає комбінація параметрів: температура $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, вологість $W=50\%$, тривалість обробки 72 год, що забезпечує майже повне забарвлення.
- Зразки з вологістю 25 % забарвлюються переважно поверхнево; за вологості 50 % аміак дифундує значно глибше.
- Дані системи CIE $L^*a^*b^*$ підтверджують різке зниження L^* , стабільні значення a^* та збільшення b^* , що відповідає темно-коричневому відтінку “fumed oak”.
- Результати дослідження дозволяють оптимізувати промислові режими модифікування та підвищити якість декоративних виробів із дуба.