

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій та дизайну

Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки
життєдіяльності

Пояснювальна записка

до магістерської роботи
на тему:

**«Дослідження та рекомендації щодо впровадження
екологічно чистих технологій лакування та фарбування
дерев'яних виробів»**

*(Research and recommendations on the implementation of environmentally friendly
technologies for varnishing and painting wooden products)*

Виконав: студент 6 курсу, групи ТЗНС-61м
Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього
середовища»

Горбач Ігор Михайлович

(прізвище та ініціали)

Керівник **Сомар Г.В.**

(прізвище та ініціали)

Рецензент **Копинець З.П.**

(прізвище та ініціали)

Львів-2025

Інститут
Кафедра

деревообробних технологій і дизайну
технологій захисту навколишнього
середовища і деревини та безпеки
життєдіяльності
магістр
183 «Технології захисту
навколишнього середовища»

Освітній рівень
Спеціальність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф.

Кшивецький Б.Я.

«30» серпня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Горбачу Ігорю Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження та рекомендації щодо впровадження екологічно чистих технологій лакування та фарбування дерев'яних виробів.
Research and recommendations on the implementation of environmentally friendly technologies for varnishing and painting wooden products

Керівник роботи: Сомар Галина Володимирівна, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом НЛТУ України від «15» травня 2025 року № С- 316

2. Строк подання студентом роботи до 15.12.2025 року.

3. Вихідні дані до роботи _____

Виконати огляд літературних джерел з проблематики екологічно чистих технологій лакування та фарбування дерев'яних виробів. Розроблення рекомендацій щодо зниження впливу на довкілля при опорядженні

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

1. Аналіз стану питання та задачі досліджень.



2. Розроблення методологічних та організаційних основ та рекомендацій щодо зниження впливу на довкілля в процесах опоряджувальних робіт

3. Охорона праці.

5. Перелік презентаційного матеріалу матеріалу

(слайди презентації результатів теоретичних і експериментальних досліджень)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 15.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
	Аналіз стану питання	до 01.10.25	
	Теоретичні дослідження	до 15.11.25	
	Обробка результатів досліджень	до 30.11.25	
	Охорона праці	до 05.12.25	
	Оформлення пояснювальної записки і підготовка презентації	до 15.12.25	

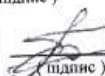
Студент


(підпис)

Горбач І. М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Сомар Г.В.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи екологічно чистих технологій лакування та фарбування деревини

- 1.1. Хімічний склад і властивості лакофарбових матеріалів
- 1.2. Класифікація та екологічні характеристики лаків і фарб
- 1.3. Вплив традиційних лакофарбових матеріалів на навколишнє середовище та здоров'я людини
- 1.4. Сучасні тенденції переходу до екологічно безпечних систем покриттів

РОЗДІЛ 2. Нормативно-правові та технологічні вимоги до екологічно безпечного фарбування деревини

- 2.1. Законодавчі та нормативні акти України щодо використання хімічних речовин у деревообробній промисловості
- 2.2. Європейські стандарти та директиви щодо лакофарбових матеріалів (VOC, REACH, Ecolabel)
- 2.3. Технологічні вимоги до безпечного нанесення та утилізації лакофарбових речовин
- 2.4. Методи оцінки екологічності технологічних процесів фарбування

РОЗДІЛ 3. Аналіз існуючих технологій лакування та фарбування на деревообробному підприємстві

- 3.1. Характеристика підприємства та діючих процесів обробки поверхонь деревини
- 3.2. Аналіз складу лакофарбових матеріалів, що застосовуються на виробництві
- 3.3. Оцінка рівня викидів летких органічних сполук (ЛОС) та інших забруднювачів
- 3.4. Вплив діючих технологій на стан повітря, води і відходів виробництва

РОЗДІЛ 4. Рекомендації щодо впровадження екологічно чистих технологій лакування та фарбування дерев'яних виробів

4.1. Порівняльний аналіз екологічних і традиційних технологій лакування

4.2. Вибір оптимальних екологічно чистих лакофарбових матеріалів

4.3. Пропозиції щодо модернізації технологічного процесу та зменшення шкідливих викидів

4.4. Економічна оцінка ефективності впровадження екологічних технологій

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі розглянуто теоретичні, правові та практичні аспекти впровадження екологічно чистих технологій лакування та фарбування дерев'яних виробів. Проаналізовано властивості традиційних лакофарбових матеріалів, їх вплив на навколишнє середовище, а також визначено ключові екологічні ризики, пов'язані з використанням летких органічних сполук. Проведено аналіз діючих технологічних процесів на деревообробному підприємстві та здійснено оцінку їх екологічної безпеки. У роботі запропоновано практичні рекомендації щодо заміни традиційних лаків і фарб на водорозчинні та поліуретанові системи з низьким вмістом розчинників, а також шляхи вдосконалення технології нанесення покриттів. Обґрунтовано економічну та екологічну доцільність впровадження сучасних безпечних технологій, що забезпечують зниження викидів шкідливих речовин і підвищення рівня екологічної відповідальності підприємства. Результати дослідження можуть бути використані у практиці екологічного менеджменту деревообробних підприємств, а також при розробці стратегій сталого розвитку галузі.

Ключові слова: екологічно чисті технології, лакофарбові матеріали, деревина, леткі органічні сполуки, екологічна модернізація, фарбування, лакування.

ANNOTATION

The master's thesis examines the theoretical, legal, and practical aspects of implementing environmentally friendly technologies for varnishing and painting wooden products. The properties of traditional paints and varnishes are analyzed, along with their environmental impact and the associated risks of volatile organic compound (VOC) emissions. The study includes an assessment of current technological processes at a woodworking enterprise and their environmental safety. Practical recommendations are proposed for replacing conventional coating materials with water-based and low-VOC polyurethane systems, as well as for improving the technological processes of application. The economic and ecological efficiency of introducing environmentally friendly technologies is substantiated, ensuring the reduction of harmful emissions and enhancing the enterprise's environmental responsibility. The research results can be applied in the practice of environmental management in woodworking enterprises and in the development of sustainable industry strategies.

Keywords: environmentally friendly technologies, paints and varnishes, wood finishing, volatile organic compounds, ecological modernization, coating, sustainability.

ВСТУП

Актуальність теми

Сучасний етап розвитку деревообробної промисловості характеризується зростанням вимог до екологічної безпеки виробництва, особливо у сфері використання лакофарбових матеріалів. Процеси лакування та фарбування деревини супроводжуються значними викидами летких органічних сполук (ЛОС), формальдегіду, ароматичних вуглеводнів та інших токсичних речовин, що негативно впливають на стан атмосферного повітря, здоров'я працівників і навколишнє середовище.

Більшість традиційних лаків і фарб містять розчинники на основі органічних сполук, які не лише погіршують умови праці, а й сприяють забрудненню довкілля. У зв'язку з цим виникає необхідність переходу на екологічно чисті технології оздоблення деревини, які відповідають принципам сталого розвитку та європейським екологічним стандартам (REACH, VOC Directive, Ecolabel).

Україна, інтегруючись у європейський ринок і приймаючи стандарти екологічного менеджменту, має активно впроваджувати сучасні екологічні технології у деревообробній галузі. Зокрема, актуальним є застосування водорозчинних лаків, натуральних олій, біолаків і фарб на основі природних смол, що забезпечують мінімальний негативний вплив на довкілля.

Таким чином, дослідження екологічно чистих технологій лакування та фарбування деревини є важливим напрямом розвитку деревообробної промисловості України, спрямованим на зменшення техногенного навантаження, поліпшення умов праці та підвищення конкурентоспроможності вітчизняних підприємств на світовому ринку.

Мета роботи - дослідити сучасні екологічно чисті технології лакування та фарбування дерев'яних виробів, оцінити їх екологічну ефективність і розробити рекомендації щодо впровадження на деревообробних підприємствах України.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати хімічний склад, властивості та вплив традиційних лакофарбових матеріалів на довкілля.

2. Дослідити чинне законодавство та екологічні стандарти України та ЄС у сфері використання лакофарбових систем.
3. Оцінити діючі технологічні процеси лакування та фарбування на деревообробному підприємстві.
4. Визначити рівень шкідливих викидів та ступінь екологічного ризику при застосуванні традиційних матеріалів.
5. Обґрунтувати можливість переходу на екологічно чисті лакофарбові системи та розробити рекомендації щодо їх впровадження.
6. Провести економічну оцінку доцільності впровадження екологічних технологій на виробництві.

Об'єкт дослідження - технологічні процеси лакування та фарбування дерев'яних виробів на деревообробних підприємствах.

Предмет дослідження - екологічно чисті технології лакофарбового покриття деревини, їх екологічна ефективність, економічна доцільність та шляхи впровадження у виробництво.

У роботі вперше в системному вигляді здійснено комплексний аналіз технологічних, хімічних та екологічних аспектів заміни традиційних лакофарбових матеріалів на екологічно безпечні аналоги у вітчизняних умовах. Сформульовано науково обґрунтовані рекомендації щодо впровадження водорозчинних і біосновних лаків у деревообробне виробництво, з урахуванням їх впливу на якість покриття, витрати енергії та рівень викидів. Визначено критерії оцінки екологічної ефективності лакофарбових технологій з урахуванням показників викидів ЛОС, енергоємності та утворення відходів.

Практичне значення роботи. Практична цінність магістерської роботи полягає у розробці конкретних пропозицій щодо впровадження екологічно чистих технологій лакування та фарбування деревини на українських підприємствах. Рекомендації можуть бути використані:

- для модернізації технологічних процесів деревообробки;
- при виборі лакофарбових матеріалів із низьким вмістом токсичних компонентів;
- у розробці екологічних програм на підприємствах;

- для впровадження систем екологічного менеджменту відповідно до стандарту ISO 14001.

Реалізація запропонованих заходів дозволить знизити обсяги шкідливих викидів, покращити екологічний стан робочої зони та сприяти переходу деревообробних підприємств до сталого розвитку.

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи екологічно чистих технологій лакування та фарбування деревини

1.1. Хімічний склад і властивості лакофарбових матеріалів

Лакофарбові матеріали (ЛФМ) є складними багатокомпонентними системами, призначеними для утворення на поверхні деревини декоративного та захисного покриття, що забезпечує естетичний вигляд виробу, його захист від вологи, ультрафіолетового випромінювання, грибків, шкідників та механічних пошкоджень. Основними компонентами будь-якого ЛФМ є плівкоутворювач, розчинник або дисперсійне середовище, пігменти, наповнювачі, пластифікатори, а також допоміжні добавки, які регулюють в'язкість, час висихання та інші властивості.

Плівкоутворювачі

Плівкоутворювач є основною речовиною, яка після висихання утворює міцну, еластичну та стійку плівку на поверхні деревини. Традиційно в лакофарбових матеріалах використовуються синтетичні полімери: алкідні, епоксидні, нітроцелюлозні, поліуретанові, акрилові смоли. Однак більшість із них синтезується з використанням токсичних мономерів і органічних розчинників, що сприяють утворенню летких органічних сполук (ЛОС) під час нанесення і висихання покриттів.

У сучасних екологічно чистих ЛФМ дедалі ширше застосовуються **водорозчинні полімери** (акрилові, поліуретанові латекси) та **біосмоли**, отримані з природних компонентів - рослинних олій, природних смол, білкових і вуглеводневих сполук. Такі плівкоутворювачі характеризуються низьким рівнем токсичності, зменшеною кількістю розчинників і кращою сумісністю з деревиною.

Розчинники та дисперсійні середовища

Розчинники забезпечують рівномірність нанесення лаку чи фарби, визначають швидкість висихання і блиск покриття. У традиційних системах використовуються леткі органічні розчинники - ксилол, толуол, ацетон, бутанол, етилацетат тощо. Вони становлять серйозну небезпеку для здоров'я людини, сприяють утворенню фотохімічного смогу та забрудненню атмосфери.

В екологічно безпечних технологіях розчинники замінюються **водою** або **біорозчинниками** на основі етанолу, естерів молочної кислоти, лімонену,

гліколів. Це дає змогу знизити вміст ЛОС у лакофарбових матеріалах у 10–20 разів.

Пігменти та наповнювачі

Пігменти надають покриттю кольору та забезпечують захист від ультрафіолетового випромінювання. Раніше широко застосовувалися пігменти, що містили свинець, кадмій, хром та інші важкі метали. Сьогодні їх використання обмежено міжнародними екологічними стандартами. У сучасних фарбах використовуються **неорганічні пігменти без важких металів** (оксиди заліза, титану, алюмінію), **органічні барвники**, а також **нанопігменти** з високою стабільністю кольору.

Наповнювачі - крейда, тальк, каолін, діоксид кремнію - регулюють блиск, в'язкість та зносостійкість покриття. Для екологічних ЛФМ використовують природні або модифіковані мінерали без токсичних домішок.

Добавки

Допоміжні компоненти (сикативи, антисептики, антипірени, стабілізатори, загусники) регулюють процеси висихання та експлуатаційні властивості покриття. В екологічно чистих системах застосовуються **біоциди природного походження** - на основі ефірних олій, восків, рослинних екстрактів - замість синтетичних токсичних домішок.

Основні властивості лакофарбових матеріалів

Основними властивостями, що визначають якість ЛФМ, є:

- **в'язкість** - впливає на рівномірність нанесення;
- **час висихання** - визначає технологічну швидкість процесу;
- **адгезія до деревини** - забезпечує міцність зчеплення;
- **твердість і еластичність плівки** - показники зносостійкості;
- **екологічність** - рівень викидів ЛОС, наявність токсичних домішок.

У порівнянні з традиційними, **водорозчинні та біолакофарбові матеріали** мають нижчу токсичність, зменшене утворення летких сполук, але водночас потребують дотримання певних технологічних режимів - температури, вологості, послідовності нанесення шарів.

Висновок до підрозділу

Хімічний склад лакофарбових матеріалів є визначальним чинником їхнього впливу на довкілля та безпеку виробництва. Перехід до використання екологічно чистих складників - водних дисперсій, природних смол, нетоксичних пігментів - є ключовою умовою екотрансформації деревообробної галузі. Це не лише зменшує шкідливі викиди, а й підвищує якість покриттів, довговічність виробів і безпеку праці.

1.2. Класифікація та екологічні характеристики лаків і фарб

Лаки та фарби, що застосовуються у деревообробній промисловості, класифікуються за низкою ознак: за типом плівкоутворювача, розчинника, способом висихання, а також за екологічною безпекою. Кожен тип матеріалу має свої фізико-хімічні властивості, рівень токсичності та ступінь впливу на довкілля.

1.2.1. Класифікація лакофарбових матеріалів

За типом плівкоутворювача:

1. **Алкідні лаки і фарби** – базуються на алкідних смолах, які добре проникають у деревину, створюють блискучу поверхню, але містять значну кількість розчинників.
2. **Нітроцелюлозні покриття** – забезпечують швидке висихання, проте містять високий рівень летких органічних сполук (ЛОС).
3. **Поліуретанові матеріали** – відзначаються високою зносостійкістю, проте можуть містити ізоціанати - токсичні компоненти.
4. **Акрилові покриття** – найпоширеніші серед екологічно безпечних систем; випускаються у водорозчинній формі.
5. **Епоксидні покриття** – застосовуються для промислових цілей, мають високу хімічну стійкість, але обмежене використання у побуті через токсичність затверджувачів.
6. **Натуральні лаки** – базуються на природних смолах, ефірних оліях, восках; екологічно безпечні, але менш стійкі до механічних впливів.

За типом розчинника:

- **Органорозчинні** - містять 40–60% органічних розчинників (ксилол, толуол, ацетон тощо), характеризуються високими викидами ЛОС.

- **Водорозчинні** - на основі водних дисперсій полімерів; безпечні, пожежостійкі, нетоксичні.
- **Безрозчинникові (100% тверді речовини)** - полімеризуються без виділення летких речовин (наприклад, УФ-лаки).

За способом висихання:

- **Фізичне висихання** - за рахунок випаровування розчинника (нітроцелюлозні, акрилові лаки).
- **Хімічне твердіння** - у результаті реакції полімеризації або зшивання (епоксидні, поліуретанові).
- **Ультрафіолетове затвердіння (УФ-лаки)** - полімеризація під дією ультрафіолетового випромінювання, без шкідливих викидів.

1.2.2. Екологічні характеристики лакофарбових матеріалів

Для оцінки екологічності ЛФМ використовують такі критерії:

- вміст летких органічних сполук (ЛОС), г/л;
- токсичність компонентів (наявність свинцю, ізоціанатів, формальдегіду);
- небезпека для працівників (пари, пил, випаровування);
- можливість вторинної утилізації тари та залишків.

Таблиця 1.1. Порівняльна екологічна характеристика основних видів лаків і фарб для деревини

Тип лакофарбового матеріалу	Основний розчинник	Вміст ЛОС, г/л	Рівень токсичності	Екологічна оцінка	Особливості застосування
Алкідні лаки і фарби	Органічні розчинники	400–600	Високий	Низька	Потребують вентиляції, тривале висихання
Нітроцелюлозні	Органічні розчинники	500–700	Дуже високий	Дуже низька	Використовуються у меблевому виробництві, але шкідливі для працівників
Поліуретанові	Органічні / безрозчинникові	200–400	Середній–високий	Середня	Міцні, стійкі, але можуть виділяти ізоціанати
Акрилові водорозчинні	Вода	<100	Низький	Висока	Екологічно безпечні, швидко висихають
Епоксидні	Органічні / безрозчинникові	150–300	Середній	Середня	Хімічно стійкі, але потребують спеціальних умов полімеризації
Натуральні (олійні, воскові, біолак)	Натуральні олії	<50	Дуже низький	Дуже висока	Безпечні, але потребують регулярного оновлення покриття
УФ-лаки (ультрафіолетове твердіння)	Без розчинників	0	Дуже низький	Дуже висока	Енергозберігаючі, швидке висихання, ідеальні для екологічного виробництва

Таким чином, аналіз показує, що екологічна класифікація лакофарбових матеріалів безпосередньо пов'язана зі складом і технологією нанесення покриття. Традиційні системи на основі органічних розчинників мають високий рівень ЛОС і токсичності, тоді як **водорозчинні, безрозчинникові та натуральні матеріали** є основою сучасного екологічно безпечного виробництва. Особливо

перспективними є **УФ-затвердні покриття та біолакофарбові системи**, які поєднують високу якість, довговічність і мінімальний вплив на довкілля.

1.3. Вплив традиційних лакофарбових матеріалів на навколишнє середовище та здоров'я людини

Традиційні лакофарбові матеріали (ЛФМ), які широко застосовуються у деревообробній промисловості, містять значну кількість летких органічних сполук (ЛОС), токсичних розчинників, пігментів та пластифікаторів. Ці компоненти мають суттєвий вплив як на стан довкілля, так і на здоров'я працівників виробництва та споживачів готової продукції.

1.3.1. Вплив на навколишнє середовище

У процесі лакування та фарбування деревини основними джерелами негативного впливу є:

- **викиди летких органічних сполук (ЛОС)** у повітря, які сприяють утворенню фотохімічного смогу;
- **утворення токсичних відходів**, зокрема промитих розчинниками тканин, залишків лаків, забруднених фільтрів і тари;
- **забруднення ґрунтів і водних об'єктів** у разі неналежної утилізації або зберігання відходів;
- **високі енерговитрати** на сушіння покриттів, що збільшує вуглецевий слід підприємства.

Особливо небезпечним є потрапляння розчинників (ксилол, толуол, ацетон) у ґрунт і стічні води, оскільки вони мають високу розчинність і низьку біодеградацію, що призводить до довготривалого забруднення природних екосистем.

1.3.2. Вплив на здоров'я людини

Працівники деревообробних підприємств, зайняті у процесах фарбування, лакування, сушіння та полірування, піддаються впливу шкідливих парів і аерозолів. Основними негативними факторами є:

- **токсичний вплив парів органічних розчинників** на центральну нервову систему (головний біль, запаморочення, нудота);
- **канцерогенна дія** деяких компонентів (наприклад, формальдегіду, толуолу, свинцевих сполук);
- **алергічні реакції та дерматити**, спричинені тривалим контактом зі смолами й затверджувачами;
- **порушення функцій дихальної системи** при роботі без вентиляції або засобів індивідуального захисту.

Випаровування токсичних речовин продовжується і після нанесення покриття - особливо в закритих приміщеннях, де використовуються меблі чи оздоблювальні вироби, покриті традиційними лаками.

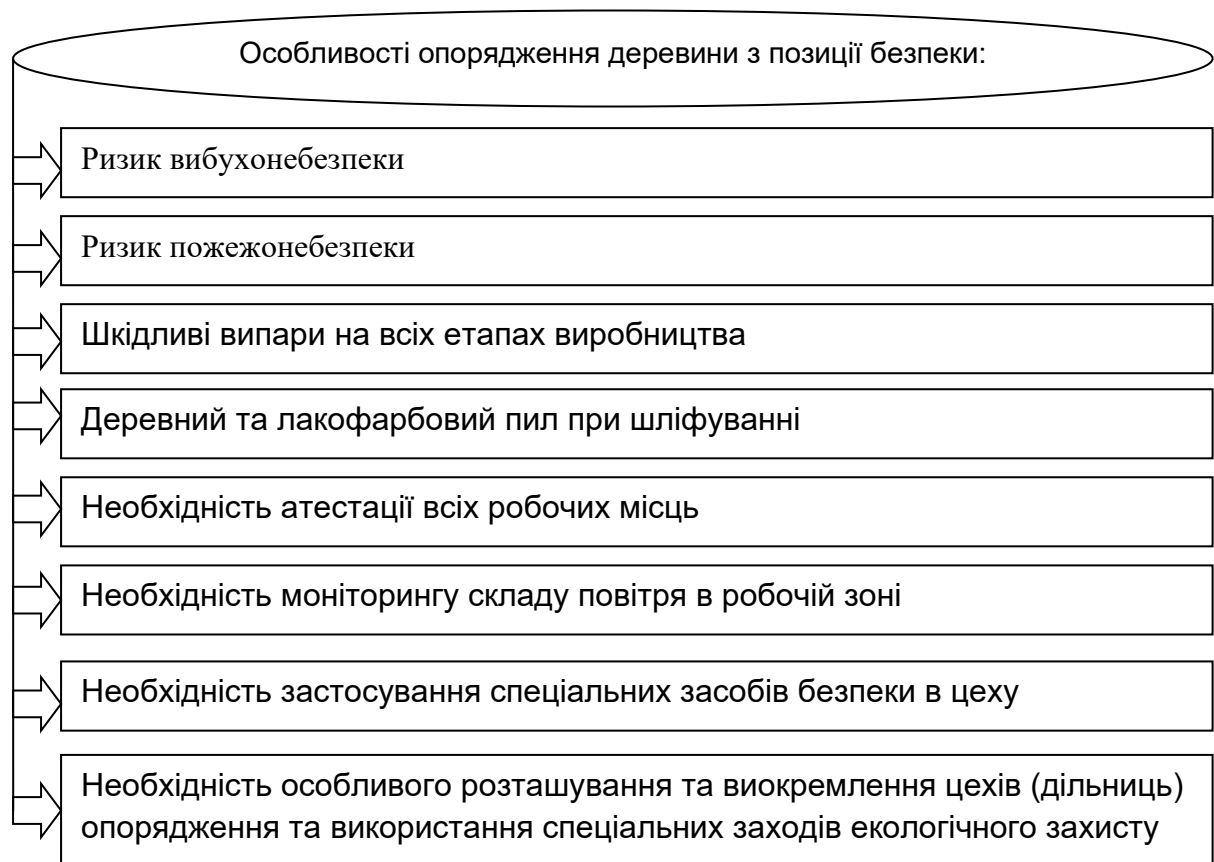


Рисунок 1.1. Сукупність ризиків та специфічних особливостей процесів опорядження в деревообробному виробництві

Таблиця 1.2. Вплив лакофарбових матеріалів на довкілля та здоров'я людини

Основний компонент ЛФМ	Джерело (тип покриття)	Характер впливу на довкілля	Вплив на здоров'я людини	Ступінь небезпеки*
Ксилол, толуол	Алкідні, нітроцелюлозні лаки	Забруднення повітря, утворення фотохімічного смогу	Нервові розлади, подразнення дихальних шляхів	Високий
Ацетон, етанол	Розчинники для лаків і фарб	Легко випаровуються, забруднюють атмосферу	Викликають головний біль, сонливість	Середній
Формальдегід	Полімерні смоли, затверджувачі	Токсичний для ґрунтів і водних організмів	Канцероген, подразнює слизові оболонки	Дуже високий
Ізоціанати	Поліуретанові системи	Можливе отруєння водних організмів	Викликають астму, алергію	Високий
Свинцеві пігменти	Старі фарби	Накопичуються в ґрунті, токсичні для біоти	Пошкодження нервової системи, нирок	Дуже високий
Леткі органічні сполуки (ЛОС)	Усі органорозчинні системи	Утворюють смог, парниковий ефект	Головний біль, нудота, подразнення очей	Високий
Пластифікатори (фталати)	З полімерними добавками	Погано розкладаються в природі	Порушення ендокринної системи	Середній
Тверді відходи лаків і фарб	Відходи виробництва	Токсичне забруднення ґрунтів	Опосередковано небезпечні	Середній

*Ступінь небезпеки: низький / середній / високий / дуже високий

Отже, традиційні лакофарбові матеріали є одним із найбільш екологічно проблемних елементів деревообробного виробництва. Їхній вплив охоплює всі компоненти довкілля - атмосферу, воду, ґрунт - і безпосередньо впливає на здоров'я людини. Найбільш небезпечними є **формальдегід, ізоціанати та леткі органічні сполуки**, які можуть накопичуватись у повітрі та біологічних

системах. Перехід до **екологічно чистих технологій лакування та фарбування** на основі водних і натуральних компонентів є необхідною умовою зниження техногенного навантаження на довкілля та забезпечення безпечних умов праці.

1.4. Сучасні тенденції переходу до екологічно безпечних систем покриттів

У сучасних умовах розвитку деревообробної промисловості спостерігається активний перехід до **екологічно безпечних технологій лакування та фарбування деревини**, що зумовлено як посиленням екологічних норм, так і зростанням попиту на «зелену» продукцію з боку споживачів. Основна тенденція полягає у **мінімізації використання летких органічних сполук (ЛОС), токсичних розчинників, а також у впровадженні водорозчинних, УФ-затверджуваних і натуральних покриттів.**

1.4.1. Водорозчинні лакофарбові системи

Одним із найперспективніших напрямів є використання **водорозчинних фарб і лаків**, у яких вода виступає основним розчинником замість токсичних органічних сполук. Такі матеріали мають низку переваг:

- зменшення викидів ЛОС у повітря до 80–90%;
- зниження ризику вибухонебезпечності виробничих приміщень;
- покращення умов праці працівників;
- легше очищення інструментів і тари;
- відсутність різкого запаху та швидке висихання.

Сучасні водорозчинні системи (на основі акрилових, поліуретанових і епоксидних дисперсій) мають високі показники адгезії, стійкості до вологи та механічних пошкоджень, що дозволяє ефективно їх застосовувати для внутрішніх і зовнішніх дерев'яних конструкцій.

1.4.2. УФ-затверджувані системи покриттів

Ще однією сучасною технологією є **ультрафіолетове (УФ) затвердіння покриттів**. Суть полягає у полімеризації спеціальних смол під дією ультрафіолетового випромінювання, що забезпечує:

- надзвичайно короткий час висихання (до кількох секунд);
- практично повну відсутність викидів розчинників;

- високу твердість і зносостійкість покриття;
- низьке енергоспоживання у порівнянні з термічним сушінням.

УФ-системи особливо ефективні для серійного виробництва меблів, підлогових покриттів, дверей і декоративних панелей, де важлива стабільна якість поверхні при мінімальних втратах часу.

1.4.3. **Натуральні та біоорієнтовані покриття**

У зв'язку зі зростанням вимог до екологічності продукції активно розвивається **сегмент натуральних покриттів**, що базуються на рослинних оліях, восках, смолах і водних емульсіях. Такі покриття мають мінімальний вміст токсичних компонентів, є біорозкладними та безпечними для людини. До їх складу входять:

- **ляна, тунгова, соєва олії** - як природна основа для формування плівки;
- **бджолиний та карнаубський віск** - для додаткового блиску та захисту від вологи;
- **водні емульгатори та натуральні барвники**, що не містять важких металів.

Використання таких систем сприяє формуванню природного вигляду деревини, не змінює її структуру та дозволяє дереву «дихати».

1.4.4. **Гібридні технології покриттів**

Сучасні виробники все частіше застосовують **гібридні системи**, що поєднують переваги кількох технологій - наприклад, водорозчинної основи з УФ-затвердінням або натуральних компонентів із поліуретановими добавками. Це дозволяє:

- зменшити токсичність матеріалу без втрати експлуатаційних характеристик;
- адаптувати покриття до різних видів деревини;
- оптимізувати виробничий процес під конкретні умови (температура, вологість, швидкість лінії).

Такі системи активно впроваджуються на сучасних деревообробних підприємствах, орієнтованих на експорт, де екологічна сертифікація є обов'язковою умовою виходу на ринок.

Таблиця 1.4 Порівняння основних типів лакофарбових систем за екологічними показниками

Тип системи покриття	Основний розчинник	Вміст ЛОС, г/л	Рівень екологічної безпеки	Сфера застосування
Алкідні	Органічні розчинники	400–600	Низький	Меблі, конструкції зовнішнього використання
Нітроцелюлозні	Ацетон, толуол	500–700	Дуже низький	Меблеве виробництво, декоративні елементи
Водорозчинні	Вода	50–100	Високий	Меблі, двері, оздоблення інтер'єрів
УФ-затверджувані	Безрозчинні смоли	< 50	Дуже високий	Масове виробництво панелей, підлог, фасадів
Натуральні (олійні, воскові)	Вода / олії	< 30	Високий	Елітна меблева продукція, екодизайн
Гібридні (водні + УФ)	Вода / смоли	30–70	Дуже високий	Високотехнологічне виробництво, експортна продукція

Висновок: перехід до екологічно безпечних систем покриттів є ключовим напрямом сталого розвитку деревообробної галузі. Сучасні тенденції свідчать про зростання ролі **водорозчинних, УФ-затверджуваних і натуральних лакофарбових матеріалів**, що дозволяють значно знизити шкідливі викиди та поліпшити умови праці. Використання таких технологій не лише відповідає вимогам екологічного законодавства, а й підвищує конкурентоспроможність підприємств на внутрішньому та міжнародному ринках.

РОЗДІЛ 2. Нормативно-правові та технологічні вимоги до екологічно безпечного фарбування деревини

2.1. Законодавчі та нормативні акти України щодо використання хімічних речовин у деревообробній промисловості

Законодавча база України у сфері використання лакофарбових матеріалів та хімічних речовин у деревообробній галузі спрямована на **захист навколишнього середовища, здоров'я працівників і споживачів**, а також на **гармонізацію національних стандартів із європейськими**.

Основними документами, що регламентують вимоги до виробництва, зберігання, транспортування і використання лакофарбових матеріалів, є закони, постанови Кабінету Міністрів, державні стандарти (ДСТУ), технічні регламенти та санітарні норми.

2.1.1. Основні напрями державного регулювання

Державне регулювання у цій сфері передбачає:

- контроль за **вмістом шкідливих речовин (летких органічних сполук, формальдегіду, толуолу, ксилолу тощо)** у матеріалах;
- обмеження використання **токсичних і канцерогенних компонентів**;
- вимоги щодо **поводження з відходами лакофарбових матеріалів**;
- сертифікацію та **екологічне маркування** продукції;
- забезпечення безпечних умов праці на виробництві.

2.1.2. Основні нормативно-правові акти України

До ключових нормативно-правових документів, що регулюють сферу використання лакофарбових матеріалів у деревообробній промисловості, належать:

Таблиця 2.1 Аналіз нормативно-правових документів щодо використання лакофарбових матеріалів у деревообробній промисловості України [1-8]

№	Назва нормативно-правового акта	Основні положення	Галузь застосування
1	Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища” (1991 р.)	Встановлює загальні вимоги щодо запобігання забрудненню довкілля, у тому числі хімічними речовинами.	Усі промислові підприємства
2	Закон України “Про відходи” (1998 р.)	Визначає порядок поводження з відходами лакофарбових матеріалів, тари та промивних рідин.	Деревообробні підприємства
3	Закон України “Про хімічну безпеку та управління хімічними речовинами” (2023 р.)	Гармонізує українське законодавство з європейською системою REACH, встановлює вимоги до обліку, маркування та безпечного використання хімікатів.	Виробники та імпортери лакофарбових матеріалів
4	Закон України “Про охорону праці” (1992 р.)	Регулює вимоги до безпеки працівників при роботі з токсичними речовинами, вентиляції та індивідуального захисту.	Виробництво та фарбування деревини
5	ДСТУ ISO 14001:2015 “Системи екологічного управління”	Визначає принципи впровадження систем екологічного менеджменту на підприємствах.	Усі промислові галузі
6	ДСТУ EN 71-3:2018 “Безпечність іграшок. Міграція певних елементів”	Встановлює норми щодо вмісту важких металів у покриттях, зокрема у виробках з деревини.	Дерев’яні вироби, меблі, іграшки
7	ДСП 201-97 “Державні санітарні правила роботи з лакофарбовими матеріалами”	Регламентує умови зберігання, вентиляції, освітлення та використання засобів індивідуального захисту.	Фарбувальні цехи деревообробних підприємств
8	Постанова КМУ № 302 (2023 р.) “Про затвердження Технічного регламенту щодо класифікації, маркування та пакування хімічних речовин”	Визначає правила маркування небезпечних речовин відповідно до системи GHS (Globally Harmonized System).	Виробники, імпортери, постачальники хімічних матеріалів

2.1.3. Гармонізація з європейськими нормами

Україна поступово переходить до **європейських стандартів екологічної та хімічної безпеки**, зокрема:

- впроваджується **REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)** - реєстрація та контроль обігу хімічних речовин;

- застосовується **CLP Regulation (Classification, Labelling and Packaging)** - класифікація і маркування хімікатів;
- стимулюється впровадження **екологічного маркування “Зелений журавлик”** для безпечних лакофарбових матеріалів українського виробництва.

Гармонізація законодавства з ЄС сприяє підвищенню конкурентоспроможності українських деревообробних підприємств, розширенню експорту продукції та впровадженню безпечних технологій у виробництві.

Отже, нормативно-правова база України у сфері використання лакофарбових матеріалів активно розвивається в напрямі **зменшення негативного впливу хімічних речовин на довкілля та здоров'я людей**. Вона включає як національні стандарти, так і норми, узгоджені з європейським законодавством (REACH, CLP). Дотримання цих вимог є обов'язковою умовою для функціонування деревообробних підприємств, які прагнуть до **екологічної сертифікації та виходу на міжнародні ринки**.

2.2. Європейські стандарти та директиви щодо лакофарбових матеріалів (VOC, REACH, Ecolabel) [9]

Екологічна політика Європейського Союзу у сфері використання лакофарбових матеріалів (ЛФМ) спрямована на **мінімізацію впливу летких органічних сполук (VOC)**, токсичних розчинників та інших небезпечних хімічних речовин на довкілля і здоров'я людини. Ключовими інструментами цього регулювання є **система REACH, Директива VOC, а також програма екологічного маркування EU Ecolabel**.

2.2.1. Директива 2004/42/ЄС (VOC Directive)

Директива 2004/42/ЄС «Про обмеження викидів летких органічних сполук» (VOC - *Volatile Organic Compounds*) встановлює **гранично допустимі концентрації VOC у фарбах, лаках та засобах для очищення поверхонь**. Основна мета - зменшити забруднення атмосферного повітря озонотворювальними речовинами.

Ключові положення:

- обмеження вмісту VOC у продуктах лакофарбового призначення (не більше 30–130 г/л, залежно від типу продукту);

- обов'язкове **маркування упаковки** з вказівкою рівня VOC;
- поступова **відмова від органічних розчинників** на користь водорозчинних систем;
- контроль на всіх етапах виробництва, транспортування і застосування лаків та фарб.

Таблиця 2.2 Особливості нормування

Категорія лакофарбового матеріалу	Максимальний вміст VOC, г/л (згідно з 2004/42/ЕС)
Внутрішні водорозчинні фарби для деревини	30–50
Органорозчинні фарби для деревини	300
Прозорі лаки на водній основі	130
Лаки на органічних розчинниках	400
Ґрунтовки та просочення	150–350

Перехід до водорозчинних систем дозволив європейським підприємствам **знижити викиди VOC на 60–70%**, одночасно підвищивши безпечність праці.

2.2.2. Регламент (ЕС) №1907/2006 - REACH

REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) - це **основний нормативний акт ЄС**, що регулює обіг хімічних речовин. Його головна мета - **забезпечення високого рівня захисту здоров'я людини та довкілля** через контроль над виробництвом і використанням хімікатів.

Основні вимоги системи REACH:

1. **Реєстрація** усіх хімічних речовин, що використовуються в кількості понад 1 т/рік.
2. **Оцінка ризиків** - визначення небезпечності речовини для людей і довкілля.
3. **Авторизація** - дозвіл на використання речовин, що мають токсичні або канцерогенні властивості.
4. **Обмеження** - заборона або обмеження застосування речовин, небезпечних для здоров'я (формальдегід, фталати, толуол тощо).

Вимоги REACH вплинули на **формулювання складу лаків і фарб**, змусивши виробників відмовитися від шкідливих компонентів і переходити до **біоосновних та безрозчинникових систем**.

2.2.3. EU Ecolabel - європейське екологічне маркування

EU Ecolabel - добровільна система сертифікації, яка присвоюється продуктам, що мають **мінімальний вплив на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу**. Для лаків і фарб встановлюються чіткі критерії, зокрема:

- низький вміст VOC (до 60 г/л для водорозчинних систем);
- **відсутність важких металів**, ароматичних розчинників, формальдегіду;
- **біорозкладність допоміжних речовин**;
- **мінімізація відходів упаковки**;
- екологічність виробничих процесів.

Таблиця 2.3 Особливості нормування

Критерій	Вимога EU Ecolabel для лаків і фарб
Вміст VOC	≤ 60 г/л
Важкі метали (Pb, Cd, Cr, Hg)	Заборонено
Формальдегід, фталати	Заборонено
Біорозкладність речовин	$\geq 90\%$
Маркування	Відповідно до стандарту ISO 14024

Отримання маркування **Ecolabel** підвищує **експортну привабливість** продукції, демонструє екологічну відповідальність підприємства і зміцнює довіру споживачів.

2.2.4. Гармонізація українських стандартів із європейськими

Україна активно працює над адаптацією законодавства у сфері хімічної безпеки до вимог ЄС. Зокрема:

- впроваджується **національний аналог REACH**, який зобов'язує реєструвати небезпечні хімічні речовини;
- адаптовано систему маркування хімікатів відповідно до **CLP Regulation (1272/2008/EC)**;
- створюються програми підтримки екологічного маркування, аналогічні **Ecolabel**, для вітчизняних виробників лаків і фарб.

2.2.5. Висновки до підрозділу

Європейські стандарти (VOC, REACH, Ecolabel) формують **інтегровану систему контролю за екологічністю лакофарбових матеріалів** - від етапу виробництва до утилізації. Вони сприяють **зниженню хімічного навантаження на довкілля, підвищенню безпеки праці та якості повітря**, а також стимулюють **інновації у хімічній промисловості**. Для України орієнтація на ці стандарти є ключовим кроком до **євроінтеграції та розвитку екологічно безпечного виробництва у деревообробній галузі**.

2.3. Технологічні вимоги до безпечного нанесення та утилізації

лакофарбових речовин [6-9]

Процес лакування та фарбування деревини, навіть за використання сучасних матеріалів, залишається потенційно небезпечним з екологічної точки зору. Основні ризики пов'язані з **викидами летких органічних сполук, утворенням відходів, забрудненням повітря та стічних вод**, а також **контактом працівників із токсичними речовинами**. Саме тому важливо забезпечити **технологічну дисципліну на всіх етапах - від підготовки поверхні до утилізації відходів**.



Рис. 2. 2. Основні типи лаків та їх характеристики

2.3.1. Організація робочого процесу фарбування

Безпечне нанесення лакофарбових речовин починається з **правильної організації робочих зон**. Фарбувальні камери та приміщення повинні мати:

- **систему припливно-витяжної вентиляції** із фільтрацією повітря, що забезпечує не менше ніж 6–8 крат повітрообмінів на годину;
- **локальні відсмоктувачі** над зонами розпилення та сушіння;
- **контроль концентрації VOC у повітрі**, що не перевищує допустимих значень;
- **автоматизацію процесів розпилення** (пневматичні, електростатичні чи роботизовані системи) для зменшення контакту людини з речовинами.

Додатково слід передбачати **системи збору пилу, туману та конденсату лаків**, що утворюються при розпиленні. Це не лише підвищує якість покриття, а й значно знижує рівень забруднення повітря в робочій зоні.

2.3.2. Вимоги до підготовки лакофарбових матеріалів

Під час підготовки до роботи необхідно:

- використовувати **герметичні ємності** для змішування і зберігання компонентів;
- уникати відкритого контакту лаків із повітрям для запобігання випаровуванню VOC;
- здійснювати **дозування матеріалів автоматизовано** або в закритих системах;
- при використанні затверджувачів - забезпечувати суворе дотримання пропорцій, щоб уникнути утворення токсичних побічних продуктів.

Підприємства мають проводити **інструктажі з безпечного поводження з ЛФМ**, а також навчати персонал щодо наслідків перевищення концентрацій небезпечних речовин.

2.3.3. Безпечні методи нанесення лаків і фарб

Вибір технології нанесення має суттєвий вплив на екологічність процесу.

Найбільш безпечними є:

- **нанесення валиком або пензлем** - мінімальні втрати матеріалу і низький рівень випаровувань;
- **занурення (імпрегнація)** - ефективне використання складу при мінімальному контакті з повітрям;
- **електростатичне розпилення** - висока ефективність покриття (до 95%) та мінімальні викиди VOC;
- **розпилення у вакуумних або напівзамкнених кабінах** - контрольований мікроклімат і мінімальне забруднення.

У сучасних технологічних лініях дедалі частіше застосовуються **водорозчинні поліуретанові, акрилові та алкідні системи**, які забезпечують необхідні експлуатаційні властивості деревини без застосування агресивних розчинників.

2.3.4. Очищення повітря та робочих поверхонь

Повітря, що виходить із фарбувальних камер, повинно проходити **двоетапну систему очищення**:

1. **Механічну фільтрацію** - видалення твердих частинок (аерозолів, крапель фарби, пилу).
2. **Адсорбційне або каталітичне очищення** - поглинання або розкладання VOC.
Для цього використовують **вуглецеві фільтри, плазмові установки, системи термічного допалювання**. Робочі поверхні очищають екологічно безпечними розчинниками - **ізопропіловим спиртом, етанолом, біоетилатом**, а не толуолом чи ксилолом.

2.3.5. Утилізація відходів лакофарбових матеріалів

Відходи лаків і фарб поділяються на:

- **рідкі (залишки фарб, розчинники, змивки);**
- **тверді (фільтри, ганчір'я, осади, шліфувальний пил).**

Безпечна утилізація передбачає:

- **збір у герметичних контейнерах** із маркуванням класу небезпеки;
- **відокремлення водної та органічної фракцій** у спеціальних відстійниках;
- **регенерацію розчинників** методом дистиляції (повернення у виробництво до 70% речовини);
- **спалювання залишків** у печах з допалюванням газів або передавання ліцензованим утилізаторам.

Категорично забороняється зливання залишків лаків чи фарб у каналізацію або відкритий ґрунт.

2.3.6. Вимоги до екологічного контролю та безпеки персоналу

Для зниження ризиків необхідно забезпечити:

- **персональний захист працівників** (респіратори, захисні костюми, рукавиці, окуляри);
- **регулярний контроль концентрацій VOC, формальдегіду, ізоціанатів** у повітрі робочих приміщень;
- **планову перевірку систем вентиляції та фільтрації;**
- **медичні огляди персоналу**, що працює з хімічними речовинами;

- ведення **журналу екологічного моніторингу**, куди заносяться дані про викиди, витрати матеріалів та результати аналізів.

2.3.7. Висновки до підрозділу

Забезпечення екологічної безпеки при нанесенні лакофарбових матеріалів вимагає **комплексного підходу**, який поєднує технологічні, організаційні та санітарні заходи. Дотримання вимог щодо вентиляції, очищення повітря, контролю викидів, безпечної утилізації та індивідуального захисту дозволяє суттєво зменшити екологічне навантаження, підвищити ефективність виробництва та забезпечити відповідність сучасним стандартам сталого розвитку.

2.4. Методи оцінки екологічності технологічних процесів фарбування

Оцінка екологічності технологічних процесів фарбування є одним із ключових елементів системи екологічного менеджменту на деревообробних підприємствах. Вона дозволяє визначити рівень впливу лакофарбових процесів на навколишнє середовище, оцінити ефективність ужитих заходів із мінімізації викидів і відходів, а також розробити шляхи вдосконалення технологій відповідно до принципів сталого розвитку.

2.4.1. Загальні підходи до оцінки екологічності процесів [9]

Сучасна практика оцінювання екологічності технологій базується на **комплексному аналізі життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA)**, який охоплює всі етапи - від виробництва лакофарбових матеріалів до утилізації відходів після фарбування.

Основні принципи оцінки:

- **системність** - розгляд усіх елементів технологічного процесу як єдиної екосистеми;
- **кількісна оцінка** - використання показників, що відображають реальний рівень впливу на довкілля;
- **порівняльність** - можливість зіставлення різних технологій або матеріалів;
- **орієнтація на результат** - розроблення рекомендацій для зниження екологічних ризиків.

2.4.2. Основні показники екологічності лакофарбових процесів

Оцінка екологічності процесів фарбування базується на низці **кількісних і якісних показників**, серед яких:

1. **Викиди летких органічних сполук (VOC)** - г/м² готової продукції або г/кг використаного матеріалу.
2. **Вміст шкідливих компонентів** у лакофарбових матеріалах (формальдегід, толуол, ксилол, ізоціанати тощо).
3. **Коефіцієнт утилізації матеріалу (η)** - співвідношення кількості матеріалу, який залишився на поверхні, до загальної витрати, %.
4. **Енергоємність процесу фарбування** - кВт·год на 1 м² покриття.
5. **Обсяг утворених відходів та стічних вод.**
6. **Індекс ризику для здоров'я працівників (IR)** - розрахований за концентраціями шкідливих речовин у повітрі робочої зони.
7. **Індекс екологічної ефективності (ІЕЕ)** - інтегральний показник, який поєднує дані про витрати ресурсів і рівень забруднення.

2.4.3. Методика розрахунку інтегрального індексу екологічності (ІЕ)

Для кількісної оцінки загального рівня екологічності процесу може бути використана формула:

$$IE = \frac{E_{\text{опт}}}{E_{\text{факт}}} \times \frac{1}{1 + K_{\text{вплив}}}$$

де:

- $E_{\text{опт}}$ - оптимальний (еталонний) рівень екологічності технології;
- $E_{\text{факт}}$ - фактичний рівень витрат ресурсів і викидів;
- $K_{\text{вплив}}$ - коефіцієнт сукупного впливу на довкілля (враховує викиди VOC, токсичність, енергоємність, відходи).

Значення ІЕ інтерпретується таким чином:

- 0,8–1,0 - **високий рівень екологічності**, технологія відповідає вимогам сталого виробництва;
- 0,5–0,79 - **задовільний рівень**, необхідна модернізація окремих етапів;

- <0,5 - **низький рівень екологічності**, процес потребує суттєвого вдосконалення.

2.4.4. Метод енергетико-екологічного аналізу

Одним із практичних способів оцінювання екологічності є **енергетико-екологічний баланс**, що враховує співвідношення витрачених енергоресурсів до обсягу виробництва:

$$E_{\text{ек}} = \frac{E_{\text{спож}}}{Q_{\text{прод}}} + \frac{W_{\text{викиди}}}{N}$$

де:

- $E_{\text{спож}}$ - сумарні енергетичні витрати на фарбування (кВт·год);
- $Q_{\text{прод}}$ - обсяг виробленої продукції (м² або м³);
- $W_{\text{викиди}}$ - маса шкідливих викидів (кг/рік);
- N - кількість одиниць продукції.

Цей метод дозволяє визначити **енергоефективність та екологічну збалансованість** виробничого процесу.

2.4.5. Експертна оцінка екологічності технологічного процесу

Для комплексного оцінювання екологічності виробництва часто застосовується **експертний метод**, який передбачає анкетування фахівців з екології, технології деревини та охорони праці.

Оцінювання проводиться за критеріями:

- рівень викидів та відходів;
- безпечність матеріалів;
- автоматизація процесу;
- рівень очищення повітря та стічних вод;
- рівень екологічної свідомості персоналу.

Результати узагальнюються у **бальній системі (від 1 до 10)**, після чого розраховується середній показник екологічності підприємства.

2.4.6. Порівняльна оцінка традиційних і екологічно чистих технологій фарбування

На основі наведених методів можна порівняти два типи технологій за основними критеріями:

Таблиця 2.5 Порівняння технологій

Показник	Традиційна технологія (розчинникові фарби)	Екологічна технологія (водорозчинні фарби)
Викиди VOC, г/м ²	120–200	10–30
Енерговитрати, кВт·год/м ²	3,5–4,0	2,0–2,5
Рівень утилізації матеріалу, %	60–70	85–90
Клас небезпеки відходів	II–III	III–IV
Індекс екологічності (ІЕ)	0,45–0,55	0,80–0,92

Отже, екологічно чисті технології забезпечують **зниження шкідливих викидів у 4–6 разів, економію енергії до 30%** та зменшення токсичності відходів.

Таким чином, методи оцінки екологічності технологічних процесів фарбування мають важливе значення для управління екологічною безпекою підприємства. Поєднання кількісних і якісних підходів - зокрема LCA, енергетико-екологічного аналізу та експертного оцінювання - дозволяє отримати об'єктивну картину стану виробництва та визначити напрями його вдосконалення. Результати таких оцінок є основою для розробки **екологічної політики підприємства**, впровадження **новітніх технологій лакування та фарбування** й підвищення рівня відповідності міжнародним стандартам **ISO 14000** та принципам сталого розвитку.

РОЗДІЛ 3. Аналіз існуючих технологій лакування та фарбування на деревообробному підприємстві

3.1. Характеристика підприємства та діючих процесів обробки поверхонь деревини

У сучасній деревообробній промисловості технології лакування та фарбування відіграють ключову роль у формуванні не лише естетичних властивостей виробів, але й у забезпеченні їхньої довговічності, стійкості до впливу вологи, ультрафіолетового випромінювання та механічних навантажень. Для аналізу ефективності існуючих технологій доцільно розглянути типове деревообробне підприємство середнього масштабу, яке спеціалізується на виготовленні меблів, дверних полотен і декоративних панелей із натуральної деревини та деревинних матеріалів.

Підприємство функціонує на базі замкнутого технологічного циклу: від первинної обробки деревини до кінцевого декоративного покриття виробів. У структурі виробництва діють такі основні цехи:

- **заготівельний цех**, де здійснюється розкрій пиломатеріалів, сушіння та калібрування деревини;
- **механоскладальний цех**, де відбувається фрезерування, шліфування, формування деталей;
- **фарбувально-лакувальний цех**, що відповідає за нанесення декоративно-захисних покриттів;
- **склад готової продукції**, де здійснюється контроль якості, упаковка та зберігання виробів.

Основні технологічні операції у фарбувально-лакувальному цеху включають:

1. **Підготовку поверхні** - очищення, шліфування та знепилення деревини.
2. **Нанесення ґрунтовки** - створення рівномірної основи для лаку чи фарби.
3. **Фарбування або лакування** - нанесення покриття розпиленням, зануренням чи валковим способом.
4. **Сушіння** - природне або примусове, за допомогою камер гарячого повітря.
5. **Полірування або фінішна обробка** - для досягнення необхідного блиску та гладкості поверхні.

На підприємстві застосовуються переважно **органорозчинні лакофарбові матеріали**, які забезпечують високий рівень блиску та твердості покриття. Разом

із тим, такі матеріали містять значну кількість **летких органічних сполук (VOC)**, що призводить до підвищення рівня забруднення повітря у виробничих приміщеннях та збільшує ризик негативного впливу на здоров'я працівників.

Система вентиляції в цеху працює комбіновано: місцева витяжна вентиляція над зонами розпилення та загальнообмінна припливно-витяжна система. Однак рівень ефективності очищення повітря залежить від технічного стану фільтрів і регулярності їх заміни.

Процес сушіння здійснюється у **теплових камерах з температурою 40–60 °С**, що забезпечує швидке висихання покриття, проте супроводжується підвищеним енергоспоживанням і викидами парів розчинників.

Для зменшення екологічного навантаження підприємство періодично тестує **водорозчинні лаки та фарби**, проте через їхню відносно високу вартість і специфічні вимоги до мікроклімату приміщень (вологість, температура) повний перехід на екологічно чисті системи покриття ще не здійснено.

У рамках політики сталого розвитку підприємство проводить моніторинг витрат матеріалів, рівня відходів та якості повітря в робочих зонах. Здійснюється облік утворення відходів лакофарбових матеріалів, залишків розчинників та осадів з фільтрів. Відходи передаються спеціалізованим підприємствам для утилізації відповідно до вимог чинного законодавства.

Загалом можна відзначити, що технологічні процеси підприємства є **технічно досконалими**, проте **екологічно недостатньо оптимізованими**. Основними проблемними аспектами залишаються:

- використання значної кількості розчинників на органічній основі;
- високий рівень енергоспоживання під час сушіння;
- неповна утилізація відходів лакофарбових матеріалів;
- відсутність автоматизованої системи контролю за концентрацією шкідливих парів у повітрі.

Подальший аналіз має бути спрямований на визначення шляхів удосконалення технологій фарбування з метою зниження негативного впливу на довкілля, підвищення ефективності використання ресурсів та впровадження екологічно чистих технологій.

3.2. Аналіз складу лакофарбових матеріалів, що застосовуються на виробництві

На досліджуваному деревообробному підприємстві основними видами лакофарбових матеріалів (ЛФМ), що використовуються для обробки деревини, є **нітроцелюлозні лаки, поліуретанові покриття, акрилові емалі та водорозчинні матеріали**. Вибір конкретного складу залежить від типу продукції (меблі, двері, декоративні панелі) та вимог до зовнішнього вигляду, блиску, зносостійкості й екологічності готового виробу.

Нітроцелюлозні матеріали

Цей тип лаків залишається одним із найпоширеніших у деревообробній промисловості завдяки швидкому висиханню та високій прозорості покриття. Основу складу становлять **нітроцелюлоза (10–20%), органічні розчинники** (ацетон, толуол, бутанол, етилацетат - до 70%), а також **пластифікатори та смоли** для підвищення еластичності.

Попри технологічну зручність, нітроцелюлозні лаки характеризуються **високим рівнем викидів летких органічних сполук (VOC)** - понад 500 г/л. Це зумовлює значне забруднення повітря робочих приміщень та створює ризики для здоров'я персоналу. Крім того, ці покриття мають невисоку стійкість до вологи та ультрафіолетового випромінювання, що обмежує їх застосування.

Поліуретанові системи

Поліуретанові лаки та емалі використовуються на підприємстві для обробки поверхонь, що потребують підвищеної міцності - наприклад, стільниць і сходових елементів. Їхній склад включає **ізоціанати** (толуїлен- або гексаметилендіізоціанат), **полііоли, органічні розчинники** (ксилол, бутанол, метилетилкетон) та **каталізатори**.

Основна перевага поліуретанових матеріалів - **висока хімічна та механічна стійкість**, гладкість і блиск поверхні. Проте ізоціанати мають **токсичні властивості**: їх пари подразнюють дихальні шляхи й можуть спричинити алергічні реакції. При недостатній вентиляції навіть невелика концентрація цих речовин у повітрі становить небезпеку для працівників.

Акрилові матеріали

Акрилові лаки та емалі застосовуються для декоративного покриття меблів преміум-класу. Вони містять **акрилові смоли, емульгатори, добавки для глянцю та органічні або водні розчинники**. Акрилові матеріали мають **нижчий вміст шкідливих речовин**, порівняно з нітроцелюлозними, та забезпечують гарну адгезію до деревини. Їхня екологічна характеристика краща, проте ціна значно вища, а умови сушіння потребують ретельного контролю температури та вологості.

Водорозчинні лакофарбові системи

Останніми роками підприємство проводить часткове впровадження **водорозчинних лаків та фарб** на основі акрилових і поліуретанових дисперсій. В їх складі **80–90% становить вода**, а решту - **сополімери акрилатів, пігменти, загусники, антиспінювачі та антисептики**.

Такі матеріали майже не містять органічних розчинників (VOC - менше 50 г/л), тому їхнє використання суттєво зменшує шкідливі викиди. Водночас, для досягнення рівномірного висихання потрібне точне підтримання температурного режиму (20–25 °С) та вологості (50–60%), що ускладнює масове впровадження в умовах наявних сушильних камер.

Таблиця 3.1 Порівняльна характеристика застосовуваних лакофарбових матеріалів

Тип матеріалу	Вміст VOC, г/л	Основні компоненти	Екологічна характеристика	Рівень безпеки для персоналу
Нітроцелюлозний	500–700	Нітроцелюлоза, ацетон, толуол	Високий рівень токсичності, утворення озону в атмосфері	Низький
Поліуретановий	300–500	Ізоціанати, поліоли, ксилол	Токсичні пари, складна утилізація	Середній
Акриловий	150–300	Акрилати, естери, спирти	Помірна токсичність, відносна екологічність	Середньо-високий
Водорозчинний	30–80	Вода, акрилові дисперсії, біоциди	Найбільш екологічний, безпечний для довкілля	Високий

Аналіз складу ЛФМ, що застосовуються на підприємстві, свідчить про **поетапний перехід від традиційних до екологічно безпечних матеріалів**. Проте близько **70%** усіх покриттів і надалі базуються на органорозчинних системах. Це зумовлено технологічною сумісністю, швидкістю висихання та нижчою вартістю таких матеріалів порівняно з водорозчинними аналогами.

Подальші напрями екотрансформації виробництва мають передбачати **збільшення частки водорозчинних і безрозчинникових покриттів**, удосконалення системи вентиляції, а також **впровадження замкнутих циклів очищення повітря** з метою зменшення викидів VOC у навколишнє середовище.

3.3. Оцінка рівня викидів летких органічних сполук (ЛОС) та інших забруднювачів

Нижче наведено кількісну оцінку викидів ЛОС та інших основних забруднювачів від фарбувально-лакувального цеху типового деревообробного підприємства. Щоби зробити розрахунок конкретним і зрозумілим, використані реалістичні припущення. **Припущення (вхідні дані):**

- Річна пофарбована площа $A=20\,000\text{ м}^2$
- Витрата лаку/фарби на один шар $c=0,12\text{ кг/м}^2$
- Кількість шарів $n=2$
- Частка органорозчинних матеріалів у суміші $f_s=0,70$ (70%), частка водорозчинних $f_w=0,30$
- VOC у органорозчинних: $350\text{ г/л}\approx 0,350\text{ кг VOC / кг фарби}$
- VOC у водорозчинних: $50\text{ г/л}\approx 0,050\text{ кг VOC / кг фарби}$
- Загальна середня **ефективність переносу** покриття на виріб (transfer efficiency) $TE=70 \rightarrow$ отже фракція, що викидається в повітря $=30\%$
- Виробництво шліфувального пилю (грубо) $p=0,05\text{ кг/м}^2$; збірна ефективність аспірації 90% (тобто 10% - емісія в атмосферу).
- Частка формальдегіду серед загальних VOC у використаних матеріалах (консервативна оцінка) $\approx 2\%$.

Крок 1 - загальна маса використаного ЛФМ (за рік)

Витрата на виріб на всі шари: $c_{\text{заг}} = n \times c = 2 \times 0,12 = 0,24\text{ кг/м}^2$.

Маса всього витраченого ЛФМ

$$M = A \times c_{\text{заг}} = 20\,000 \times 0,24.$$

:

Рахуємо: $20\,000 \times 0,24 = (20\,000 \times 24) / 100 = 480\,000 / 100 = 4\,800\text{ (кг)}$.

Отже, $M=4\,800\text{ кг/рік}$.

Крок 2 - маси органорозчинної і водної фракцій

Маса органорозчинної частини:

$$M_s = M \times f_s = 4\,800 \times 0,70.$$

Рахуємо:

$$4\,800 \times 0,7 = 3\,360\text{ (кг)}$$

Маса водорозчинної частини:

$$M_w = M \times f_w = 4\,800 \times 0,30.$$

Рахуємо:

$$4\,800 \times 0,3 = 1\,440 \text{ (кг)}.$$

Крок 3 - маса VOC, що міститься в використаних матеріалах

VOC з органорозчинних:

$$VOC_s = M_s \times 0,350 = 3\,360 \times 0,35.$$

Рахуємо по частинах: VOC з водорозчинних:

$$3\,000 \times 0,35 = 1\,050$$

$$360 \times 0,35 = 126$$

$$\text{Разом} = 1\,050 + 126 = 1\,176 \text{ (кг)}.$$

Рахуємо: Сумарна маса VOC, введена у процес:

$$1\,440 \times 0,05 = 72 \text{ (кг)}.$$

$$VOC_w = M_w \times 0,05 = 1\,440 \times 0,05.$$

$$VOC_{total} = 1\,176 + 72 = 1\,248 \text{ (кг/рік)}.$$

Крок 4 - оцінка фактичних емісій VOC в атмосферу

Якщо ефективність переносу TE=70%, то фракція, яка викидається в повітря =

1-TE=0,30. Тоді емісія VOC в атмосферу:

$$VOC_{emit} = VOC_{total} \times 0,30 = 1\,248 \times 0,30. \text{ Рахуємо:}$$

$$1\,248 \times 0,3 = 374,4 \text{ (кг/рік)}.$$

Округлено: ≈ 374 кг VOC/рік.

Крок 5 - оцінка емісій пилу від шліфування

Генерація пилу:

$$D_{gen} = A \times p = 20\,000 \times 0,05.$$

Рахуємо:

$20\,000 \times 0,05 = 1\,000$ (кг/рік) — загальна маса пилу, що утворюється.

При 90% зборі (ефективність аспірації), емісія пилу:

$$D_{emit} = D_{gen} \times (1 - 0,90) = 1\,000 \times 0,10 = 100 \text{ кг/рік.}$$

Отже, **приблизно 100 кг пилу/рік** може потрапляти в атмосферу за таких умов.

Крок 6 - приблизна оцінка емісій формальдегіду

Припустимо, формальдегід становить $\approx 2\%$ від загальної маси VOC у використаних матеріалах. Тоді: Маса формальдегіду в ужитому ЛФМ:

$$F_{used} = VOC_{total} \times 0,02 = 1\,248 \times 0,02 = 24,96 \text{ кг.}$$

Емісія формальдегіду (за тим самим коефіцієнтом 30% вилучення в атмосферу):

$$F_{emit} = 24,96 \times 0,30 = 7,488 \text{ кг/рік.}$$

Округлено: **приблизно 7,5 кг формальдегіду/рік** (за наведених припущень).

Підсумок розрахунку (за вихідними припущеннями)

- Використано лакофарбових матеріалів (річно): **4 800 кг.**
- Загальна маса VOC у матеріалах: $\approx 1\,248$ кг/рік.
- Оцінена емісія VOC в атмосферу: ≈ 374 кг/рік.
- Емісія шліфувального пилу (після збору 90%): ≈ 100 кг/рік.
- Оцінка емісії формальдегіду: $\approx 7,5$ кг/рік.

Інтерпретація та рекомендації (коротко)

1. Оцінені емісії VOC (≈ 374 кг/рік) - це значна кількість для регіонального джерела; їх можна істотно скоротити переходом від органорозчинних систем до водорозчинних/безрозчинникових або УФ-технологій.
2. Підвищення **ефективності переносу** (наприклад, з 70% до 85% шляхом електростатичного розпилення або оптимізації технології) зменшить емісію VOC приблизно з 374 кг/рік до: $1\,248 \times (1 - 0,85) = 187,2$ кг/рік - майже вдвічі.
3. Впровадження систем адсорбції/допалювання відхідних газів (РТО, адсорбційні фільтри з регенерацією) дозволяє знищувати $>95\%$ вилучених VOC, що у випадку нашого прикладу зменшить фактичні вихідні викиди до кількох десятків кілограмів на рік.

4. Покращення аспірації шліфувального пилю (збір>95%) зменшить пилові емісії до <50 кг/рік.
5. Зниження частки органорозчинних матеріалів з 70% до 20–30% (заміна на водорозчинні системи) зменшить сукупний VOC у сировині приблизно в 2–3 рази.

Примітки щодо невизначеностей

- Результати - приблизні і лінійно масштабуються з виробничими параметрами. Якщо виробнича площа, витрата на м², частка розчинникових матеріалів або transfer efficiency відрізняються - емісії зміняться відповідно.
- Оцінка формальдегіду дуже чутлива до припущення про його частку в загальних VOC; у різних матеріалах ця частка може бути як нижчою (<1%), так і значно вищою.
- Для точного звіту потрібні реальні дані: фактичні витрати кожного типу ЛФМ (кг або л), їхні лабораторно підтверджені значення VOC (г/л), реальні коефіцієнти переносу по використовуваних технологіях та показники збору пилю.

3.4. Вплив діючих технологій на стан повітря, води і відходів виробництва

Процеси лакування та фарбування деревини на сучасних деревообробних підприємствах, зокрема на підприємстві, що розглядається у даній роботі, мають комплексний вплив на навколишнє природне середовище. Основні фактори негативного впливу пов'язані з викидами летких органічних сполук у повітря, потраплянням залишків лакофарбових матеріалів у стічні води, а також утворенням відходів, що містять токсичні компоненти.

Вплив на атмосферне повітря. Під час нанесення лаків і фарб у повітря виділяються леткі органічні сполуки (ЛОС), зокрема ксилол, толуол, ацетон, етиловий спирт, бутанол та інші органічні розчинники. Ці речовини спричиняють утворення приземного озону та фотооксидантів, які шкідливо впливають на дихальну систему людини й рослинний покрив. При недостатній вентиляції або застарілих системах фільтрації концентрація ЛОС у робочих зонах може перевищувати гранично допустимі концентрації, що призводить до підвищення професійних ризиків для працівників.

Крім органічних сполук, при використанні деяких лаків утворюються дрібнодисперсні частинки твердих аерозолів, які осідають на обладнанні, у вентиляційних каналах і можуть потрапляти у зовнішнє середовище, погіршуючи якість атмосферного повітря навколо підприємства.

Вплив на водне середовище. Під час очищення обладнання, інструментів та тари утворюються стічні води, забруднені залишками лакофарбових матеріалів, розчинниками, смолами, пігментами та іншими домішками. Без належного попереднього очищення такі стоки містять токсичні речовини, здатні викликати біохімічне споживання кисню (БСК) та хімічне споживання кисню (ХСК), що знижує рівень кисню у водоймах та шкодить водним екосистемам.

Якщо підприємство не має замкнутого циклу водопостачання або ефективної системи локальної очистки, існує ризик забруднення ґрунтових вод та навколишніх водних об'єктів. У багатьох випадках відбувається накопичення осадів, які містять органічні сполуки та важкі метали (наприклад, свинець чи хром з деяких старих фарб), що потребують спеціальної утилізації.

Вплив на утворення відходів. У процесі фарбування утворюються такі типи відходів:

- залишки лакофарбових матеріалів, що втратили свої властивості;
- осади від фільтрації та очищення стічних вод;
- забруднені розчинниками ганчірки, фільтри, тара та упаковка;
- пил від шліфування деревини перед покриттям.

Ці відходи класифікуються як небезпечні, оскільки містять токсичні органічні сполуки. Неналежне зберігання або спалювання таких відходів призводить до додаткових викидів у повітря і ґрунт.

Загальна екологічна оцінка. Сумарний екологічний вплив діючих технологій фарбування і лакування можна вважати середнім за рівнем безпеки. Основні проблеми полягають у високій питомій кількості ЛОС у повітрі, наявності органічно забруднених стоків і відходів, які потребують спеціальної утилізації.

Позитивним аспектом є поступовий перехід підприємства на водорозчинні системи покриттів і більш економні методи нанесення, такі як пневматичне розпилення з низьким тиском або автоматизовані системи дозування. Однак для

досягнення високого рівня екологічності необхідно вдосконалити систему очищення вентиляційного повітря, модернізувати очисні споруди та впровадити комплексну систему поводження з відходами.

Таким чином, діючі технології фарбування та лакування мають відчутний вплив на стан повітря, води та відходів виробництва, однак цей вплив може бути істотно знижений завдяки впровадженню сучасних екологічно орієнтованих рішень і технологічних інновацій.

РОЗДІЛ 4. Рекомендації щодо впровадження екологічно чистих технологій лакування та фарбування дерев'яних виробів

4.1. Порівняльний аналіз екологічних і традиційних технологій лакування

Під час вибору технологій лакування та фарбування деревини на сучасних деревообробних підприємствах важливо враховувати не лише якість і довговічність покриттів, але й їхній вплив на навколишнє середовище та безпеку працівників. Традиційні лакофарбові матеріали на основі органічних розчинників мають високі експлуатаційні властивості, однак характеризуються підвищеним рівнем токсичності, значними викидами летких органічних сполук (ЛОС) і складністю утилізації. Натомість екологічно чисті технології, зокрема водорозчинні, УФ-затверджувані або порошкові системи покриттів, дають змогу суттєво зменшити екологічне навантаження на виробництво, не поступаючись у якості.

Основна відмінність між традиційними та екологічними технологіями полягає у типі зв'язувальної речовини, розчинника та способі висихання покриття. Традиційні системи базуються на використанні летких органічних розчинників (ксилолу, толуолу, ацетону тощо), тоді як сучасні екотехнології орієнтовані на використання води або безрозчинникових компонентів. Це дає змогу не лише зменшити шкідливі викиди, а й підвищити безпеку праці персоналу, покращити санітарно-гігієнічні умови у фарбувальних цехах.

Для наочності наведемо **порівняльну характеристику традиційних і екологічних технологій лакування деревини** (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Порівняння традиційних і екологічно чистих технологій лакування деревини

Критерій	Традиційні технології (на розчинниках)	Екологічно чисті технології (водорозчинні, УФ-затверджувані)
Основний розчинник	Органічні леткі речовини (ксилол, ацетон, толуол)	Вода або УФ-олігоефіри
Викиди ЛОС	Високі (до 400–600 г/л)	Дуже низькі (до 50 г/л або відсутні)
Токсичність матеріалів	Висока	Мінімальна
Пожежна небезпека	Висока (вибухонебезпечні пари)	Практично відсутня
Енерговитрати при сушінні	Значні (потрібне нагрівання)	Менші (висушення за кімнатної температури або під УФ)
Час висихання покриття	4–8 годин	10–60 хвилин (водні) або кілька секунд (УФ-затверджувані)
Якість покриття	Висока, але залежить від досвіду оператора	Висока та стабільна
Складність утилізації відходів	Висока, небезпечні відходи	Мінімальна, відходи нетоксичні
Вартість матеріалів	Нижча на одиницю, але більші втрати при нанесенні	Вища, але економніша витрата
Відповідність екостандартам	Обмежена	Повна відповідність директивам ЄС (VOC, REACH)

Як видно з таблиці, екологічно чисті технології мають низку переваг у сфері охорони довкілля та безпеки праці. Вони забезпечують суттєве зниження викидів ЛОС, мінімізують утворення небезпечних відходів, знижують пожежонебезпеку та покращують умови праці. Хоча початкові витрати на впровадження таких

технологій (оновлення обладнання, навчання персоналу) є вищими, у довгостроковій перспективі це забезпечує економію ресурсів і зменшення екологічних платежів.

Таким чином, перехід до екологічно чистих технологій лакування є не лише вимогою сучасного законодавства та європейських стандартів, а й стратегічно вигідним напрямом розвитку деревообробних підприємств. Він дозволяє поєднати високу якість продукції з відповідальністю перед суспільством і природою, що формує позитивний імідж підприємства як екологічно орієнтованого виробника.

4.2. Вибір оптимальних екологічно чистих лакофарбових матеріалів

Одним із ключових етапів переходу до екологічно безпечного виробництва є вибір лакофарбових матеріалів (ЛФМ), що відповідають сучасним вимогам екологічності, безпеки праці та якості готової продукції. Ефективність екотрансформації деревообробного виробництва значною мірою залежить від того, наскільки вдало підібрано типи лаків, фарб і допоміжних матеріалів для конкретних технологічних процесів.

При виборі екологічно чистих ЛФМ слід урахувувати такі **критерії**:

- **вміст летких органічних сполук (ЛОС)** - не більше 50 г/л відповідно до вимог Директиви ЄС 2004/42/ЄС;
- **відсутність токсичних компонентів** (формальдегіду, толуолу, свинцю, фталатів);
- **низький рівень запаху і відсутність шкідливих випарів** під час нанесення та сушіння;
- **відповідність міжнародним екостандартам** (Ecolabel, Blue Angel, Nordic Swan, GREENGUARD);
- **високі експлуатаційні властивості** - міцність, еластичність, стійкість до стирання, блиск, стабільність кольору.

Екологічно чисті лакофарбові системи поділяють на три основні групи:

1. **Водорозчинні матеріали** - дисперсії поліуретанів, акрилатів або алкідів у водному середовищі. Переваги: низькі викиди ЛОС, легке очищення

інструментів, відсутність різкого запаху. Недоліки: дещо більший час висихання порівняно з розчинниковими системами.

2. **УФ-затверджені покриття** - полімеризуються під дією ультрафіолетового випромінювання. Переваги: практично нульові викиди ЛОС, висока швидкість твердіння, відмінна зносостійкість. Недоліки: потребують спеціального обладнання (УФ-лампи) і контролю товщини шару.

3. **Безрозчинникові матеріали (порошкові покриття)** - формують плівку шляхом термічного розплавлення смол. Переваги: відсутність випарів, мінімальні втрати матеріалу, простота утилізації. Недоліки: складність застосування до натуральної деревини без спеціальної підготовки.

Для порівняння основних характеристик екологічних лакофарбових матеріалів наведено **таблицю 4.4**.

Таблиця 4.4 Порівняння основних характеристик екологічних лакофарбових матеріалів

Тип матеріалу	Вміст ЛОС, г/л	Швидкість висихання	Екологічність	Стійкість до стирання	Орієнтовна вартість	Сфера застосування
Водорозчинні лаки (акрилові, поліуретанові)	30–50	1–2 год	Висока	Висока	Середня	Меблі, підлоги, двері
УФ-затверджувані покриття	<10	10–60 сек	Дуже висока	Дуже висока	Висока	Масове виробництво, паркет
Порошкові покриття	0	10–20 хв (термообробка)	Абсолютна	Висока	Середня–висока	Плити МДФ, меблеві фасади
Натуральні олії та воски	0	3–6 год	Висока	Середня	Висока	Елітні меблі, інтер'єри
Гібридні системи (вода + УФ)	<20	30–90 сек	Дуже висока	Дуже висока	Висока	Фінішне лакування

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що **найоптимальнішими для сучасних деревообробних підприємств є водорозчинні та УФ-затверджувані системи покриттів**. Вони поєднують високу якість, технологічну зручність і відповідність екологічним вимогам.

Для підприємств малого та середнього масштабу доцільно рекомендувати **поетапний перехід** на водорозчинні матеріали - як проміжний етап перед впровадженням більш інноваційних технологій (наприклад, УФ-сушіння). Це дозволяє мінімізувати капітальні витрати, одночасно зменшуючи екологічні ризики.

Таким чином, грамотний вибір лакофарбових матеріалів є основою екологічної трансформації технологічних процесів, що забезпечує не лише зниження шкідливих викидів, а й підвищення якості кінцевої продукції, конкурентоспроможності підприємства та його відповідності міжнародним

екологічним стандартам.**4.3. Пропозиції щодо модернізації технологічного процесу та зменшення шкідливих викидів**

Модернізація технологічного процесу лакування та фарбування деревини є ключовим напрямом екологічної трансформації деревообробного виробництва. Основна мета такої модернізації - зниження рівня викидів летких органічних сполук (ЛОС), формальдегіду, частинок пилю та побічних продуктів хімічних реакцій, а також забезпечення безпечних умов праці для персоналу.

Для досягнення цієї мети пропонуються комплексні **організаційно-технологічні, інженерні та екологічні рішення**, спрямовані на оптимізацію всіх стадій лакофарбового процесу - від підготовки поверхні до сушіння готового виробу.

1. Впровадження енергоефективних технологій нанесення

Одним із найефективніших способів зниження екологічного навантаження є **заміна традиційного пневматичного розпилення на сучасні технології нанесення**:

- **HVLP (High Volume Low Pressure)** - забезпечує меншу втрату матеріалу (до 10–15%) і знижує концентрацію аерозольних частинок у повітрі цеху.
- **Airless і Airmix системи** - дозволяють отримати більш рівномірне покриття при мінімальному розпиленні летких речовин.
- **Електростатичне нанесення** - підвищує коефіцієнт переносу фарби до 90–95%, що суттєво знижує кількість відходів.

Результат - зменшення споживання ЛФМ на 20–30%, зниження викидів ЛОС на 40–50%.

2. Перехід на замкнуті або частково замкнуті цикли очищення повітря

Для мінімізації впливу шкідливих речовин на атмосферу доцільним є встановлення **систем регенерації та рециркуляції повітря**, оснащених фільтрами різних типів:

- **вуглецевими сорбційними фільтрами** - для уловлювання органічних парів;
- **фільтрами з активованою глиною або цеолітом** - для селективного очищення від специфічних сполук;
- **плазмохімічними реакторами** - для глибокого руйнування органічних компонентів у газовій фазі.

Такі системи дозволяють повертати до **70–80%** очищеного повітря у **виробничий простір**, зменшуючи обсяг шкідливих викидів у довкілля та економлячи енергію на вентиляцію.

3. Оптимізація процесів сушіння

Стадія сушіння є однією з найенергоємніших і супроводжується викидом значної кількості ЛОС. Для зменшення цього впливу пропонується:

- використовувати **інфрачервоні або УФ-сушильні установки**, що скорочують час висихання у 5–10 разів;
- впровадити **теплообмінні системи рекуперації**, які повертають частину теплової енергії в технологічний цикл;
- застосовувати **автоматизовані системи контролю вологості та температури**, які запобігають перевитраті енергії.

Ефект: зниження енергоспоживання на 25–30%, скорочення часу технологічного циклу майже вдвічі.

4. Заміна токсичних розчинників на водорозчинні системи

Традиційні органічні розчинники (ксілол, толуол, ацетон) є джерелом небезпечних для здоров'я і довкілля викидів. Рекомендується поступовий перехід на **водорозчинні або безрозчинникові лакофарбові матеріали**, які мають такі переваги:

- відсутність токсичних випарів;
- зниження вмісту ЛОС до 20–50 г/л;
- сумісність із сучасними автоматизованими системами нанесення.

4.3. Експериментальне дослідження ефективності роботи вентиляційної установки

Вентиляційні установки використовуються для забезпечення свіжого повітря та видалення шкідливих речовин з приміщення опоряджувального цеху. Дослідження їх ефективності дозволяє забезпечити належні умови для здоров'я та комфорту людей, зокрема у виробничих приміщеннях. Тому нам важливо вміти виявляти проблеми, пов'язані з недостатньою вентиляцією, шумом або незадовільною якістю повітря.

Апаратура для дослідження:

1. Вентиляційна установка.
2. Мікроманометр з трубкою Прандтля.

3. Пневмометрична трубка.
4. Набір накладок для зміни діаметра трубопроводу вентиляційної установки.

Результати замірів звели ми в таблиці 4.4-4.5

Таблиця 4.4 Результати дослідження продуктивності та ефективність роботи місцевої механічної вентиляції

Назва параметру	Значення параметрів				
	Номер досліду				
	1	2	3	4	Без шибру
Діаметр повітропрохода Д, мм	68	49	36	26	130
Площа повітропрохода F, м ²	0,004	0,002	0,001	0,0005	0,013
Покази шкали прилада, П	15	18	23	25	8
Постійна прилада, К	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Швидкісний тиск, Рд., Па	29,4	35,28	45,08	49	15,68
Швидкість повітря, м/с	7	7,67	8,67	9,04	5,12
Продуктивність, Q, м ³ /год	80,64	44,1792	24,9696	13,0176	191,6928
Об'єм приміщення, V, м ³	100	100	100	100	100
Коефіцієнт кратності повітрообміну, КВ фактичний	0,8064	0,441792	0,249696	0,130176	1,916928
нормативний	7	7	7	7	7

Таблиця 4.5 Результати дослідження впливу діаметра повітропроводу на продуктивності та ефективність роботи місцевої механічної вентиляції

Діаметр повітропроводу (мм)	Продуктивність вентиляції (м ³ /год)	Ефективність (кВт/м ³ /год)	Коментарі
100	150	0,05	Найменша продуктивність
150	300	0,04	Зростання продуктивності
200	450	0,03	Оптимальний діаметр
250	600	0,03	Подальше зростання
300	750	0,04	Вища ефективність
350	850	0,05	Збільшення витрат на енергію
400	900	0,06	Найвища продуктивність

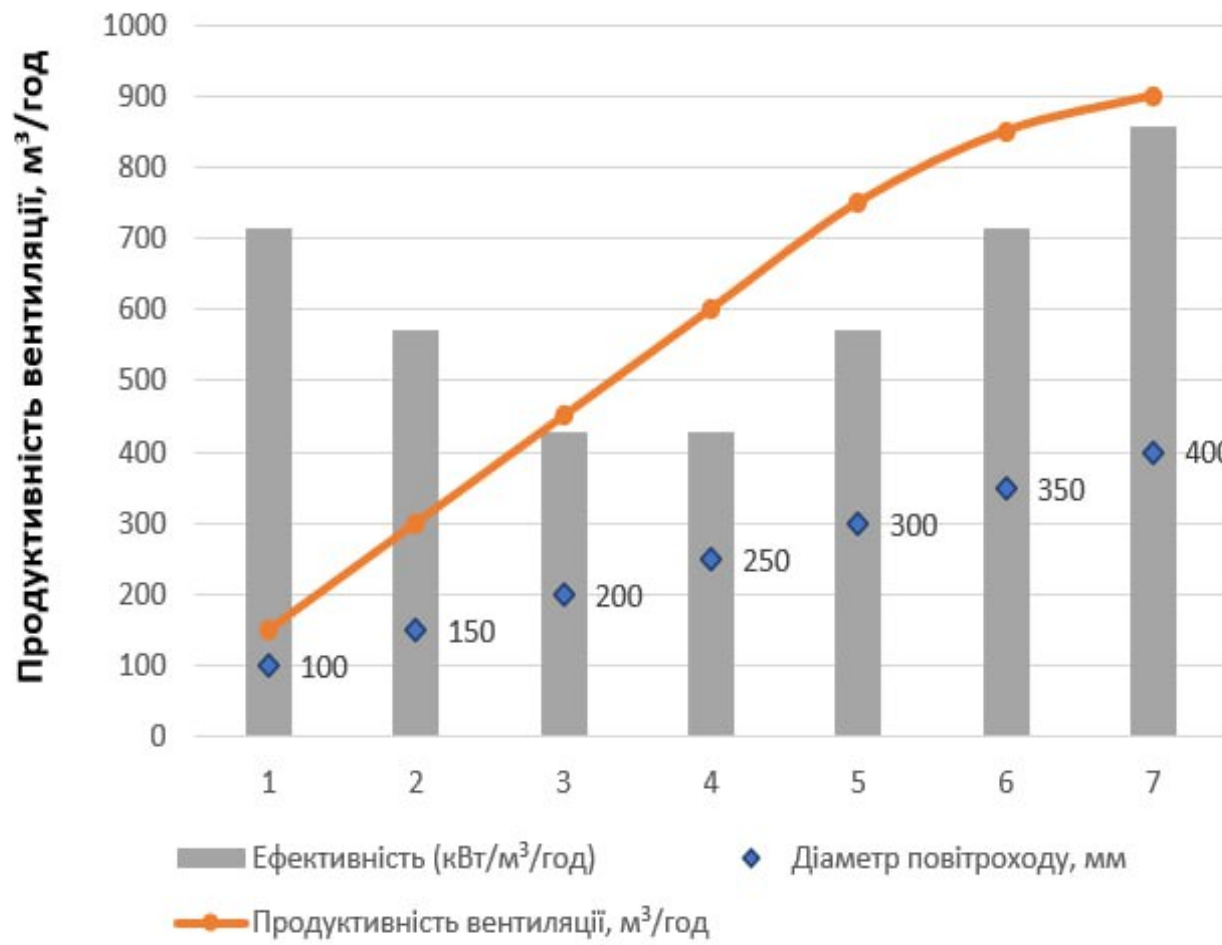


Рисунок 4.1. Графічна інтерпретація результатів експериментальних досліджень

Результат: поліпшення умов праці, зменшення ризиків професійних захворювань, зниження екологічного навантаження на атмосферу.

5. Організаційні заходи

Для ефективності технологічних змін важливим є **впровадження системи екологічного менеджменту (EMS)**, що включає:

- періодичний екологічний аудит виробничих процесів;
- навчання персоналу правилам поводження з ЛФМ;
- впровадження політики «Zero Waste Paint Shop» - мінімізація відходів фарб і лаків шляхом оптимізації замовлень і змішування.

6. Орієнтовна оцінка ефективності впровадження

На основі середніх показників деревообробних підприємств оцінено можливий ефект модернізації:

Таблиця 4.5 Можливий ефект модернізації

Заходи	Зниження викидів ЛОС, %	Економія матеріалів, %	Зменшення енергоспоживання, %
Перехід на водорозчинні ЛФМ	40–60	10–15	5–10
Впровадження HVLP або електростатичного розпилення	30–50	20–25	10–15
Рециркуляція повітря з фільтрацією	60–70	-	10–20
Оптимізація сушіння (ІЧ, УФ)	-	-	25–30

Сумарний ефект: можливе зменшення загального рівня викидів шкідливих речовин на **50–65%** при одночасному зниженні енергоємності виробництва на 20–25%.

Отже, модернізація технологічного процесу лакування та фарбування деревини на основі екологічних принципів дозволяє досягти не лише значного **екологічного ефекту**, але й **економічної вигоди** за рахунок раціонального використання ресурсів, підвищення продуктивності праці та якості продукції. Це відповідає сучасним тенденціям розвитку зеленої економіки та стратегії сталого промислового виробництва.

4.4. Економічна оцінка ефективності впровадження екологічних технологій

Оцінка економічної ефективності екологічно чистих технологій лакування та фарбування дерев'яних виробів є важливим етапом обґрунтування

доцільності їх впровадження. Вона дозволяє визначити окупність інвестицій, рівень економії ресурсів, скорочення витрат на енергію, утилізацію відходів і зниження екологічних платежів.

В умовах сучасного деревообробного виробництва перехід на **екологічно безпечні лакофарбові системи і енергоощадні технології нанесення** не лише покращує екологічні показники підприємства, але й сприяє зменшенню собівартості продукції за рахунок оптимізації споживання матеріалів та енергії.

1. Основні статті витрат і економії

При впровадженні екологічно орієнтованих технологій на підприємстві витрати і вигоди можна поділити на такі групи:

- **Капітальні інвестиції** – закупівля обладнання (HVLР або електростатичні розпилювачі, фільтраційні системи, УФ-сушильні камери).
- **Поточні витрати** – вартість водорозчинних лаків і фарб, витрати на обслуговування систем очищення повітря.
- **Економічні вигоди** – скорочення споживання лакофарбових матеріалів, зниження енергоспоживання, менші платежі за забруднення довкілля, зменшення витрат на утилізацію відходів.

2. Приклад розрахунку економічного ефекту

Для оцінки використаємо умовні, але реалістичні показники деревообробного підприємства, яке переходить на екологічно чисті технології лакування.

Показник	До впровадження	Після впровадження	Економічний ефект
Споживання лакофарбових матеріалів, кг/рік	15 000	12 000	Економія 3 000 кг
Вартість ЛФМ, грн/кг	180	200	-
Витрати на ЛФМ, грн/рік	2 700 000	2 400 000	Економія 300 000
Енергоспоживання (сушіння, вентиляція), кВт·год/рік	250 000	180 000	Економія 70 000
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	4,0	4,0	-
Витрати на енергію, грн/рік	1 000 000	720 000	Економія 280 000
Екологічні платежі (викиди ЛОС, відходи), грн/рік	150 000	80 000	Економія 70 000
Загальна річна економія, грн	-	-	650 000

3. Розрахунок терміну окупності інвестицій

Вартість модернізації технологічної лінії (обладнання для нанесення, вентиляційні системи, УФ-сушіння, навчання персоналу) становить приблизно **2 000 000 грн**. Тоді термін окупності інвестицій визначається за

$$T = \frac{I}{E}$$

формулою: де T – термін окупності, років; I – сума інвестицій, грн; E – річна економія, грн.

Підставимо значення:

$$T = \frac{2\,000\,000}{650\,000} = 3,08 \text{ роки.}$$

Отже, **термін окупності становить приблизно 3 роки**, після чого підприємство отримує чистий економічний прибуток.

4. Додаткові вигоди від екотехнологій

Окрім прямого економічного ефекту, впровадження екологічно чистих технологій приносить підприємству низку **непрямих переваг**:

- підвищення якості продукції та стабільності покриттів;
- поліпшення умов праці та зменшення ризиків профзахворювань;
- зниження витрат на медичне обслуговування персоналу;
- підвищення конкурентоспроможності підприємства на європейському ринку;
- можливість отримання екологічних сертифікатів (ISO 14001, EU Ecolabel), що відкриває нові ринки збуту.

5. Підсумкова оцінка економічної ефективності

Показник	Значення
Сума інвестицій	2 000 000 грн
Річна економія	650 000 грн
Термін окупності	3 роки
Зниження витрат на енергію	28%
Зниження споживання ЛФМ	20%
Зниження викидів ЛОС	45–55%

Висновок: Результати економічної оцінки свідчать, що впровадження екологічно чистих технологій лакування та фарбування є **фінансово доцільним і екологічно ефективним рішенням**. Уже протягом перших трьох років підприємство може повністю компенсувати інвестиційні витрати, а подальша експлуатація забезпечить стабільну економію ресурсів, зниження екологічних ризиків та покращення іміджу виробника на ринку.

Розділ 5. Охорона праці

Організація безпечного нанесення лакофарбових матеріалів

В даний час на меблевих підприємствах застосовують різні способи нанесення лакофарбових матеріалів на поверхні меблевих щитів та інших заготовок, зокрема: розпилення; в електричному полі струменів високої напруги; лаконалив; занурення. Спосіб нанесення лакофарбових матеріалів в основному залежить від конструкції меблевих виробів, марки ЛФМ, виду технологічного обладнання тощо. Порівнюючи дані способи нанесення лакофарбових матеріалів на деталі з позиції кількості виділення летких токсичних речовин у повітря робочої зони, приходимо до висновку, що найбільш трудомістким і шкідливим є пневматичне розпилення ЛФМ. Цей спосіб фактично відноситься до ручного лакопокриття.

Для розпилювання ЛФМ використовують стиснуте повітря, яке подається у пістолет-розпилювач під тиском 0.3...0.5 МПа. Лак (фарба) подається до розпилювача під тиском 0.02...0.15 МПа. Зустрічаючи на своєму шляху сильний повітряний потік, лак розпилюється форсункою пістолета і лягає на опоряджувальну поверхню у вигляді найдрібніших крапель, які, розпилюючись, утворюють суцільне покриття.

При роботі на пневматичних установках необхідно регулярно слідкувати за справністю припливної та витяжної вентиляції. Тиск у ресивері компресора не повинен перевищувати 0,5 МПа, у відокремлювачі вологи та масла – 0,4 МПа, в лаконагнітачі – 0,15...0,2 МПа. Разом з цим необхідно регулярно перевіряти закріплення кришки лаконагнітача, продувати повітрям і промивати розчинником пістолет і шланги, що підводять лаки (фарби). Пістолет, лаконагнітач, витяжну систему вентиляції та повітропровід обов'язково заземляють.

З метою запобігання проникнення у повітря робочої зони шкідливих і вибухонебезпечних парів летких речовин і виникнення аварійних ситуацій при пневматичному розпилюванні лаків (фарб) необхідно :

- розпилювати лаки й фарби тільки в закритих або напівзакритих камерах;
- швидко й повністю вилучати лакову й фарбову мряку із зони її утворення;
- очищати повітря від шкідливих і вибухонебезпечних парів, що знаходяться в зоні лакування;
- обладнати камери розпилювання і вентиляційні системи обмежувальними та вогнеперепонними пристроями;
- обладнати камери автоматично-блокувальними пристроями, які б забезпечували припинення подавання лаку чи фарби при зупинці роботи вентиляційної установки;
- регулярно очищати kabіни, повітроходи, фільтри застосувавши для цього інструменту із кольорового метала;
- застосовувати камери та інше обладнання із негорючих матеріалів.

Найбільш прийнятними для пневматичного розпилювання в даний час є напівзакриті камери з робочими отворами, які оснащені витяжними вентиляційними установками, заблокованими з системою подавання лаку (фарби).

Надійне та безпечне очищення повітря від лакового порошу досягається в камерах з гідрофільтрами, що мають дві водяні завіси, які створюються форсунками діаметром не менше 4 мм при тиску 25...30мм.вод.ст. (рис. 4.3).

Для того щоб не утворювалась шкідлива і вибухонебезпечна суміш в камерах, потрібно мати таку вентиляційну систему, яка забезпечувала б

швидкість руху повітря через робочі отвори кабін в сторону витягування, більшу, ніж швидкість дифузії розчинників і розріджувачів в сторону цеху.

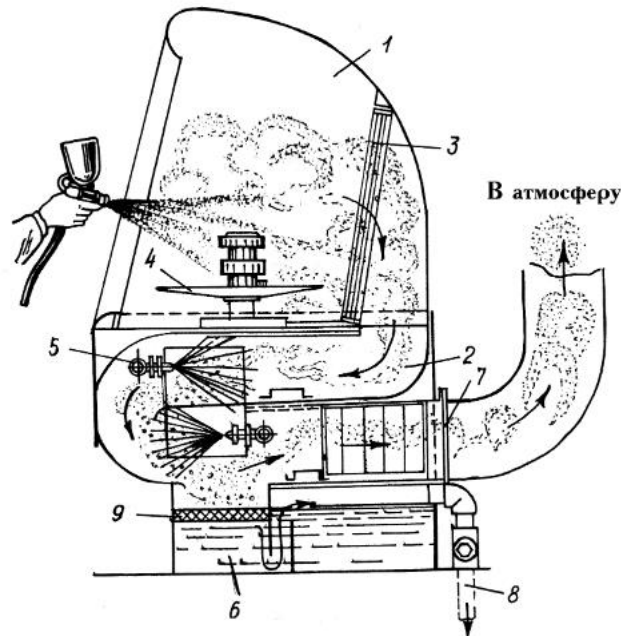


Рис.5.3.. Камера з гідрофільтрами для нанесення лаку пневматичним розпилюванням: 1 - корпус; 2 - коробка гідрофільтра; 3 - лаковловлювальна решітка; 4 - поворотний стіл; 5 - водорозпилювальні форсунки; 6-водяна пастка; 7 - водовідокремлювач; 8- зливна труба ; 9 - відстій лаку (фарби) .

Повітрообмін у камері, що забезпечить нормальні та безпечні умови роботи, визначають за формулою:

$$Q_k = 3600 \cdot F \cdot v_o \cdot \alpha, \quad (5.1)$$

де Q_k - кількість повітря, що пропускається через кабінку, $m^3/год$; F - поперечний перетин отворів камери, m^2 ; v_o - швидкість руху повітря в отворі камери, що поступає в кабінку, m/c ; α - коефіцієнт, що враховує підсмоктування повітря через нещільності кабінки (для розрахунків приймають рівними 1,1...1,2).

При визначенні повітрообміну за формулою (6.8) , необхідно мати на увазі, що швидкість дифузії парів більшості розчинників не перевищує 0,1 м/с. Крім цього, при подаванні лаку через розпилювачі необхідно враховувати відбиття струменя з повітрям від лакованої поверхні. При цьому швидкість відбитого струменя лаку біля лакованого виробу, як підтверджують дослідження, складає 0,7...0,8 м/с. Виходячи з цього, для запобігання проникнення шкідливих і вибухонебезпечних парів розчинників із камер у приміщення цеху, при розрахунку необхідно приймати швидкість руху повітря у відкритому отворі камери в сторону вентилятора не нижче 1,0 м/с. При використанні лакофарбових матеріалів, що вміщують свинцеві сполуки, ароматичні вуглеводні та інші токсичні леткі речовини, розрахункову швидкість повітря (V_0) необхідно приймати не менше 1,3 м/с.

Об'єм вентиляційного повітря на робочих місцях необхідно приймати із розрахунку 1400 м³ повітря за 1 годину на 1м² площі горизонтальної проекції меблевого виробу з врахуванням робочої площі шириною 1 м навколо виробу.

У випадку несправності вентиляційної установки камери, необхідно якомога швидше припинити лакування, повідомити про аварійний стан майстра або начальника цеху.

Після закінчення роботи необхідно спустити із ресивера через спускний кран воду, масло та бруд. Відходи лаків, фарб, використані тампони, ганчірки змочені лакофарбовими матеріалами, складають у металеві ящики зі щільно закритими кришками, які виносять із цеху у спеціально відведені місця.

Нанесення ЛФМ в електричному полі струменів високої напруги – досить поширений спосіб опорядження меблів. Характерною особливістю даного способу з позиції санітарно-гігієнічних умов є те, що при даному

способі не витрачається велика кількість ЛФМ на утворення лакової чи фарбової мряки, як це відбувається при пневматичному розпилюванні, зменшується загазованість повітря робочої зони.

Сутність цього способу нанесення ЛФМ полягає в наступному. Якщо простір між двома електродами, до яких підведена висока електронапруга, ввести струмінь розпиленого лаку, то під дією електричного поля його частини електризуються і притягуються до позитивно зарядженого виробу. Частини лаку (фарби), попавши в електричне поле, притягуються до виробу рівним тонким шаром з мінімальними втратами.

Схема лакування меблевих виробів в електростатичному полі наведені на рис. 5.4.

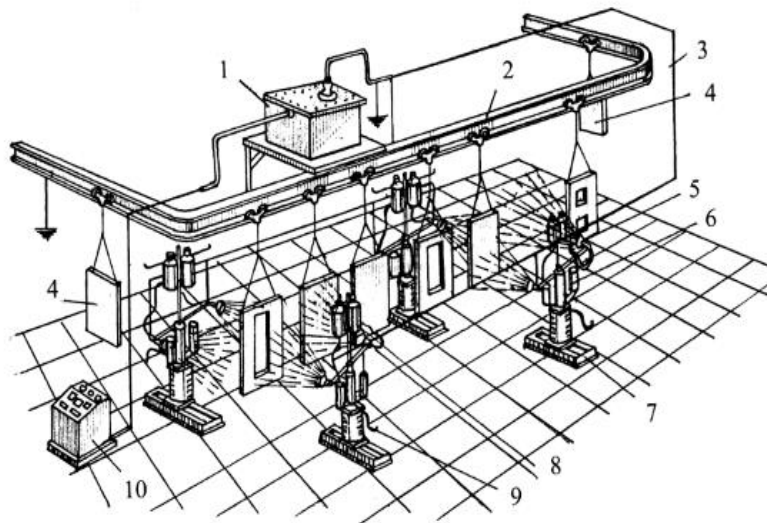


Рис.5.4. Схема лакування дерев'яних виробів в електростатичному полі:
1- високовольтний трансформатор і випрямлювач струму (подається напруга 130 кВ); 2- підвісний конвеєр; 3- високовольтна мережа; 4 - вироби; 5 - чашкові розпилювачі; 6 - пневматичні циліндри; 7 - ізолятори стійки чашкових розпилювачів; 8 - бачки для лаку (фарби); 9 - шланги для подання стиснутого повітря; 10 - пульт керування.

Кращим опоряджувальним матеріалом для електростатичного нанесення є лак МЧ-52 тому, що розчинники цього лаку не утворюють вибухонебезпечних повітряних сумішей.

При лакуванні деталей в електростатичному полі можливі непередбачені аварійні ситуації за причини несправності витяжної вентиляції, утворення вибухонебезпечної суміші, короткого замикання, виникнення електричної іскри від електростатичних розрядів, порушення режимів лакування тощо.

Для забезпечення безпечної роботи при лакуванні меблевих деталей в електростатичному полі необхідно передбачити наступні заходи:

- камери для лакування обладнують витяжною вентиляцією, яка забезпечує відсмоктування повітря через перфоровані повітропроводи, розміщені в чотирьох кутах камери;
- розрахунковий об'єм відсмоктувального повітря визначають за швидкістю його руху у відкритих отворах, що приймається в межах 0,4...0,5 м/с і перевіряється на розведення парів розчинників, які виділились, до безпечної концентрації; швидкість руху вентилязованого повітря з kabіни і безпосередньо із зони розпилювання лакофарбових матеріалів в сторону витягування приймають 0,2...0,5 м/с;
- лакувальну камеру обладнують автоматичним пристроєм, що підтримує встановлений режим подачі лаку (фарби) в залежності від ефективності роботи вентиляції й стану електрообладнання
- для попередження виникнення іскрового розряду в камері передбачають відстань між розпилювальним кінцем шланга автоматичного розряджувача та високовольтною шиною

- значно меншою ніж між розпилювачем і деталлю (виробом); при цьому іскровий розряд виникатиме за межами лакувальної камери;
- для автоматичного вимкнення лакувальної камери, у випадку раптового збільшення сили струму в робочій мережі, в пульті керування камерою передбачають максимальне реле;
 - для обмеження величини сили струму при короткому замиканні або іскровому розряді у високовольтній мережі передбачають обмежувальний опір;
 - електрообладнання в лакувальних камерах повинне мати захисні пристрої, до яких відносять автоматичні розряджувачі, попереджувальні світлофори, запобіжники від іскроутворювання;
 - камери для лакування в електростатичному полі обладнують блокувальною системою, яка:
 - забезпечує подачу звукового сигналу протягом 10...15сек. до пуску конвеєра;
 - запобігає ввімкненню високої напруги при вимкненій місцевій витяжній вентиляції;
 - запобігає ввімкненню системи розпилювання при вимкненій місцевій витяжній вентиляції.

Перед подаванням високої напруги в лакувальну камеру автоматично подаються попереджувальні сигнали:

“ Висока напруга”, “Ввімкнено”, “Не входити”.

Пульт керування лакувальною камерою розташовують на відстані не менше 2,5м від розпилювачів.

Нанесення ЛФМ на поверхні меблевих щитів способом наливу є одним із найпоширенішим способів на сучасних меблевих підприємствах. Він здійснюється на лаконаливних машинах, які забезпечують високу якість

лаконаливних покриттів. Але поряд з позитивними сторонами лаконаливу, даний спосіб має ряд суттєвих недоліків з точки зору безпеки праці. У повітря робочої зони інтенсивно випаровуються леткі компоненти з нітроцелюлозних і поліефірних лаків.

Інтенсивність випаровування летких компонентів з лаків при їх наливі на поверхні меблевих щитів може бути визначена за J - інтенсивністю випаровування, $\text{г/м}^2\cdot\text{год.}$; k - показником леткості, $\text{г/м}^2\cdot\text{год.}$; e - числом $\cong 2,72$; t - часом витримування деталей після лаконаливу, год. ; μ_0 - початковим вмістом леткого компонента в лаці, г/м^2 .

Для розроблення заходів щодо покращення санітарно-гігієнічних умов в опоряджувальних цехах необхідно знати масу летких речовин, що виділяються з лаків і потрапляють у повітря робочої зони.

Спосіб нанесення лаку струменевим обливанням найчастіше використовують для лакування точених дерев'яних деталей і виробів з криволінійними і фігурними поверхнями. Струменеве обливання з наступним витримуванням у парах розчинників полягає в тому, що деталь (виріб) обливають лаком і направляють у камеру або тунель, у повітрі яких знаходиться визначена кількість парів розчинника. Тут лишок лаку стікає, а решта його рівномірно покриває поверхню деталі.

Цей спосіб лакування має наступні переваги порівняно з іншими способами, а саме:

- значно скорочується витрата лаку ;
- створюється можливість конвеєрної подачі деталей і виробів у камери, тунелі та сушарні;
- створюються сприятливі умови для впровадження засобів автоматизації і забезпечення пожежної безпеки процесу лакування;

- зменшується маса лаку що знаходиться в системі в 10 разів, порівняно з лакуванням способом занурення; зменшується можливість виникнення великих пожеж.

4.4. Аварійне зливання лакофарбових матеріалів

Аварійне зливання лакофарбових матеріалів – важлива умова забезпечення безпеки при опорядженні меблів. В тих випадках, коли за умов виробництва необхідно встановлювати ванни великої ємності, передбачають швидке вилучення лаку за межі цеху під час аварії або пожежі. Це досягається влаштуванням аварійного зливання лаку (фарби) у підземний резервуар. Зливання лаку (фарби) передбачають самопливом через зливну трубу великого діаметру, що йде від дна ванни до резервуара.

Діаметр зливних труб установлюють у залежності від ємності ванн:

Ємність, м ³	2...3,	3...4,	4...10,	10...15
Діаметр труб, мм	300,	400,	500,	600

Підземний резервуар для аварійного зливання розташовують за межами опоряджувального цеху на відстані не менше 1 м від глухої стіни будівлі і не менше 5 м при наявності в стіні отвору.

Принципальна схема аварійного зливання лаку (фарби) із збірної ємності в підземний резервуар наведена на рис.5.5.

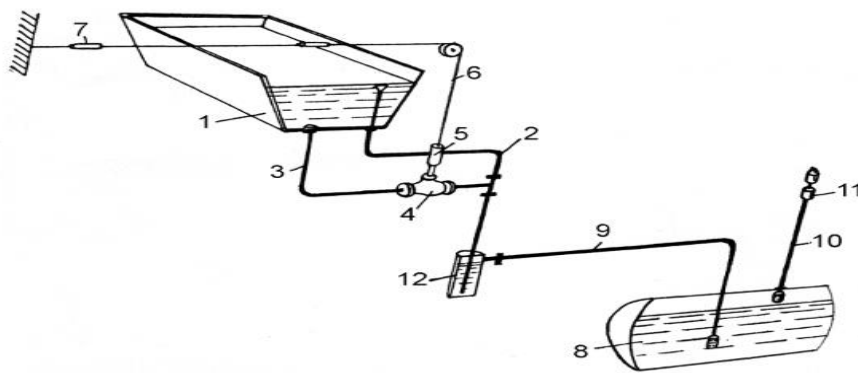


Рис.5.5. Схема аварійного зливання лакофарбових матеріалів

Дана система складається з ємності 1, переливної труби 2, аварійної труби 3, оснащеної засувкою 4, що відкривається за допомогою приводу 5 в момент перегорання або розплавлення легкоплавкого замка 7 і звільнення тросу 6. Зливна лінія 9 відводить через гідрозатвор 12 лакофарбові матеріали в аварійну ємність 8. Для забезпечення нормального тиску в ємності, вона оснащена витяжною трубою 10, обладнаною вогнеперепонувачем 11. Легкоплавкий замок на тросі встановлюють близько від ємності, де найбільш ймовірно загорання. Гідрозатвор розташовують проти проникнення полум'я із лакувальної ванни в аварійну ємність.

Безпечне висушування лакофарбових покриттів

В технологічному процесі операція сушіння є найбільш тривалою, оскільки вона найчастіше повторюється. На висушування іноді витрачається до 95% всього часу, затраченого на опорядження. Операція висушування лакових покриттів спричиняє інтенсивне виділення у повітря парів різноманітних розчинників і розріджувачів. Маса виділених із ЛФМ летких компонентів у повітря буде меншою за умови скорочення тривалості і підвищення температури висушування лакофарбових покриттів. Тому в

даний час є актуальним удосконалення технології опорядження меблів з метою скорочення термінів висушування лакофарбових покриттів без зниження їхньої якості, покращення санітарно-гігієнічних умов. Це дає змогу не тільки скоротити тривалість виробничого циклу, зекономити виробничі площі та покращити санітарно-гігієнічні умови, але й автоматизувати операції висушування й технологічний процес опорядження в цілому.

На сьогодні найбільш поширеними є конвекційний, терморадіаційний, фотохімічний способи, а також спосіб акумулювання тепла на поверхні деталей.

При конвекційному способі висушування (випаровування розчинників) відбувається найінтенсивніше з верхніх шарів, що сприяє утворенню на поверхні покриття плівки, яка гальмує вихід парів розчинників з нижньої її частини. Це призводить, з однієї сторони, до тимчасового зниження загазованості повітря робочої зони, а з іншої, при підвищенні температури - до утворення бульбашок з парів розчинників і погіршення якості лакованої поверхні. Для усунення цього дефекту висушування ведуть ступеневим режимом, тобто сушильну камеру розмежують на чотири режимних зони. Температуру в першій зоні приймають 20...25 °С, у другій – 25...30 °С, в третій – 30...40 °С, а в четвертій – 20 °С [52].

Поліефірні лаки гарячого тверднення висушують при температурі 60...80 °С протягом 2,5...3 год., а лаки холодного тверднення – при температурі 20...25 °С протягом 15...20 год.

З гігієнічної точки зору конвекційний спосіб висушування лакових покриттів відноситься до найбільш шкідливих і небезпечних для обслуговуючого персоналу.

При експлуатації металевих сушарок можливі опіки, проникнення парів розчинників через нещільності камери. Тому для запобігання опіків обслуговуючого персоналу камери обшивають теплоізоляційним матеріалом, ущільнюють стикові місця на їх поверхнях. Такі камери обладнують потужною витяжною вентиляцією, яка блокується з пусковими пристроями з метою запобігання утворення вибухонебезпечної суміші. Для полегшення роботи при завантаженні і розвантаженні конвекційні сушарки обладнують конвеєрами спеціальної конструкції.

Найбільш досконалими та безпечними для висушування лакофарбових покриттів є терморадіаційні камери, які основані на способі опромінювання лакованої поверхні інфрачервоними променями. Вони проникають крізь лаковий шар і на деяку глибину в деревину, де перетворюються на теплову енергію, нагріваючи поверхню деревини. Нагріта поверхня деревини віддає тепло лаковому шару, внаслідок чого відбувається процес висихання плівки знизу в декілька разів швидше, ніж при конвекційному способі, а покриття стає рівним і гладким без бульбашок.

Добре себе зарекомендував з точки зору безпеки є фотохімічний спосіб висушування лакових покриттів. Цей спосіб полягає в тому, що поліефірні покриття тверднуть внаслідок полімеризації під дією ультрафіолетових променів при наявності сенсibilізатора (речовини, що прискорює процес полімеризації поліефірних матеріалів). Перевагою цього способу є те, що поліефірне покриття твердне досить швидко (0,5...5,0 хв.) внаслідок чого зменшується кількість випаровувань летких компонентів лаків у повітря сушарок. За таким принципом працює фотохімічна сушарка СФХ-2М, яка складається з металевого каркаса з пластинчатим конвеєром і світильників.

Ефективний спосіб фотохімічного затвердження поліефірних рафіноутримуючих лаків ПЕ-246 і ПЕ-265 розроблений Українським

державним лісотехнічним університетом. Сутність цього способу полягає в тому, що ультрафіолетові промені від люмінесцентних ламп спрямовуються на лакове покриття, в яке замість загально прийнятого прискорювача введено спеціальний більш безпечний фотосенсибілізатор – метиловий або ізобутиловий ефір бензоїну. Для зменшення затрат шкідливого лаку і підвищення його адгезії з деревиною, зменшення шкідливих виділень у повітря було запропоновано поліефірне ґрунтування фотохімічного затвердження ПЕ-0129, а також дисперсію наповнювачів у розчині поліефірмаленатної смоли, в якій розміщено фотоініціатор.

Економічно вигідним і найбільш безпечним є спосіб висушування акумулюванням тепла на поверхні деревини. Він полягає в нагріванні опоряджувальної поверхні перед нанесенням на неї лакофарбового матеріалу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання магістерської роботи на тему *«Дослідження та рекомендації щодо впровадження екологічно чистих технологій лакування та фарбування дерев'яних виробів»* було проведено комплексний аналіз теоретичних, нормативних, технологічних та економічних аспектів переходу деревообробних підприємств до екологічно безпечних методів обробки деревини.

У **першому розділі** розглянуто теоретичні основи лакофарбових процесів. Визначено хімічний склад і властивості традиційних лаків та фарб, охарактеризовано їх вплив на довкілля та здоров'я людини. Показано, що використання розчинників на основі летких органічних сполук (ЛОС) є однією з основних причин забруднення повітря, утворення фотохімічного смогу та професійних захворювань серед працівників. Проаналізовано сучасні тенденції переходу до екологічно чистих систем покриттів - водорозчинних, УФ-отверджуваних і порошкових матеріалів.

У **другому розділі** вивчено нормативно-правові вимоги до використання лакофарбових матеріалів в Україні та країнах Європейського Союзу. Проаналізовано положення законодавства щодо контролю вмісту шкідливих речовин у виробничих процесах, вимоги до утилізації відходів, а також впровадження систем екологічного маркування (Ecolabel). Окремо розглянуто технологічні аспекти безпечного нанесення покриттів та методи оцінки екологічності виробничих процесів.

У **третьому розділі** здійснено аналіз діючих технологій лакування та фарбування на конкретному деревообробному підприємстві. Досліджено склад лакофарбових матеріалів, що застосовуються, оцінено рівень викидів летких органічних сполук і визначено їх вплив на стан атмосферного повітря, водних ресурсів та відходів виробництва. Проведено розрахунок обсягів

викидів ЛОС, що підтвердив необхідність модернізації технологічного процесу з метою зменшення екологічного навантаження.

У **четвертому розділі** розроблено рекомендації щодо впровадження екологічно чистих технологій. Проведено порівняльний аналіз традиційних та екологічних систем покриттів, визначено оптимальні матеріали, які забезпечують високі експлуатаційні властивості при мінімальному впливі на довкілля. Запропоновано конкретні заходи модернізації - застосування водорозчинних лаків, енергоощадного обладнання, систем фільтрації та рекуперації повітря. На основі економічних розрахунків встановлено, що термін окупності інвестицій становить близько трьох років, а річна економія ресурсів може перевищувати 600 тис. грн.

Отже, результати дослідження підтверджують, що впровадження екологічно чистих технологій лакування та фарбування дерев'яних виробів є **не лише екологічно необхідним, але й економічно вигідним напрямом розвитку деревообробних підприємств**. Такі технології сприяють:

- зниженню викидів шкідливих речовин на 40–60%;
- покращенню умов праці персоналу;
- зменшенню споживання енергії та матеріалів;
- підвищенню якості продукції та конкурентоспроможності підприємства;
- відповідності національним та європейським екологічним стандартам.

Впровадження запропонованих заходів сприятиме екологічній модернізації деревообробної галузі України, забезпечить сталий розвиток виробництва та гармонізацію економічних і природоохоронних інтересів.

Таким чином:

1. **Визначено екологічні ризики традиційних ЛФМ** – висока частка ЛОС, негативний вплив на довкілля й здоров'я працівників.

2. **Проаналізовано нормативні вимоги** України та ЄС щодо безпечного використання покриттів, утилізації відходів і екологічного маркування.
3. **Оцінено реальний стан підприємства** – встановлено підвищені викиди ЛОС та підтверджено потребу модернізації технологій.
4. **Запропоновано екотехнології** – водорозчинні та УФ-матеріали, ефективна фільтрація й рекуперація, енергоощадне обладнання.
5. **Обґрунтовано економічний ефект** – скорочення викидів на 40–60%, покращення умов праці, економія понад 600 тис. грн/рік, окупність \approx 3 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 р. № 1264-ХІІ.
2. Закон України «Про відходи» від 05.03.1998 р. № 187/98-ВР.
3. Закон України «Про хімічні речовини та суміші» від 01.01.2021 р.
4. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування.
5. ДСТУ EN 16516:2021. Будівельні вироби. Оцінювання емісії небезпечних речовин.
6. ДСТУ 3017-95. Матеріали лакофарбові. Терміни та визначення.
7. Білоконь О. В. Екологічна безпека промислових технологій. - Київ: КНУБА, 2018. - 212 с.
8. Глущенко І. М., Козак Л. І. Екологічні аспекти використання лакофарбових матеріалів у деревообробній промисловості. - Львів: УАД, 2020. - 158 с.
9. Дорошенко І. С. Сучасні технології зниження викидів ЛОС у виробництві лакофарбових покриттів. // Вісник НУ «Львівська політехніка». - 2019. - № 5. - С. 112–118.
10. Кравець В. Г. Технологія оздоблення деревини. - Київ: Либідь, 2016. - 224 с.
11. Мельник О. П. Аналіз екологічних ризиків при використанні органічних розчинників у деревообробній промисловості. - Рівне: НУВГП, 2021. - 145 с.
12. Сокіл В. В., Литвин Н. М. Екологічно безпечні лакофарбові системи: наукові підходи та перспективи. // Екологічна безпека та природокористування. - 2020. - № 3. - С. 27–34.
13. Лісовський О. В. Організаційно-технологічні рішення з утилізації відходів лакофарбового виробництва. // Науковий вісник НЛТУ України. - 2022. - Т. 32, № 1. - С. 87–94.

14. Гончарук Т. І. Оцінка екологічної безпеки деревообробного виробництва. - Тернопіль: ТНТУ, 2021. - 178 с.
15. Державна екологічна інспекція України. Звіт про стан атмосферного повітря за 2023 рік. - Київ, 2024.
16. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Огляд впровадження принципів зеленої економіки у деревообробній промисловості. - Київ, 2022.
17. Європейська комісія. Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH) - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals.
18. Directive 2004/42/EC of the European Parliament and of the Council on the limitation of emissions of volatile organic compounds. - Official Journal of the European Union, 2004.
19. European Commission. EU Ecolabel for paints and varnishes: User manual. - Brussels, 2021.
20. ISO 16000-9:2019. Indoor air - Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing.
21. OECD Environmental Outlook for the Chemical Industry. - Paris: OECD Publishing, 2022.
22. Rydin, Y., & Holman, N. Environmental governance and innovation in the manufacturing sector. - London: Routledge, 2020.
23. Singh, A., Kumar, P., & Kaushik, C. P. *Sustainable coatings and eco-friendly surface finishing technologies*. - Springer, 2021.
24. Holopainen, M. Eco-efficient wood coating technologies for sustainable production. - Helsinki: Finnish Forest Research Institute, 2020.
25. UNEP. *Guidelines for the Reduction of Volatile Organic Compounds from Paints and Coatings*. - Nairobi, 2022.