

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:

**Оцінка та порівняльний аналіз використання методів
фільтрації для зменшення викидів пилу та газів на
деревообробних підприємствах.**

*Assessment and comparative analysis of the use of filtration
methods to reduce dust and gas emissions in woodworking
enterprises*

Виконав: студент 6 курсу, групи ТЗНС-61м
Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього
середовища»
Отчич Н.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник Соколовський І.А.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Ференц О.Б.
(прізвище та ініціали)

Львів-2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут
Кафедра

деревообробних технологій і дизайну
технологій захисту навколишнього
середовища і деревини та безпеки
життєдіяльності

Освітній рівень
Спеціальність

магістр
183 «Технології захисту
навколишнього середовища»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф.

Кшивецький Б.Я.

“30” серпня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Отчичу Назарію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Оцінка та порівняльний аналіз використання методів фільтрації для зменшення викидів пилу та газів на деревообробних підприємствах.**

Assessment and comparative analysis of the use of filtration methods to reduce dust and gas emissions in woodworking enterprises

Керівник роботи: Соколовський Ігор Андрійович, 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, дослідження ступеня забруднення повітряного середовища від деревообробного виробництва і технологій його очищення

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

1. Аналіз стану питання та задачі досліджень.



2. Дослідження технологій зменшення забруднення викидів в повітряне середовище від деревообробних підприємств. Розроблення рекомендацій

щодо вдосконалення технологій очищення повітря з урахуванням специфіки деревообробного виробництва

3. Охорона праці.

4. Перелік презентаційного матеріалу: (слайди презентації результатів досліджень)

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц. Сомар Г.В.		

6. 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	
	Аналіз та оцінка результатів досліджень	до 30.11.25	
	Охорона праці	до 05.12.25	
	Оформлення пояснювальної записки і підготовка презентації	до 15.12.25	

Студент  Отчич Н.М
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  Соколовський І.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи утворення та очищення викидів пилу і газів на деревообробних підприємствах

- 1.1. Джерела утворення пилу та газоподібних викидів у деревообробній промисловості
- 1.2. Вплив пилу та газів на довкілля і здоров'я людини
- 1.3. Огляд методів очищення газопилових викидів: фільтрація, абсорбція, адсорбція, електрофільтрація
- 1.4. Нормативно-правові вимоги щодо очищення викидів в Україні та ЄС

Висновки до розділу 1

РОЗДІЛ 2. Методи фільтрації для зменшення пилових і газових викидів

- 2.1. Класифікація та принцип дії фільтраційних систем
- 2.2. Тканинні фільтри: конструкція, ефективність та експлуатаційні особливості
- 2.3. Рукавні фільтри: переваги, недоліки та сфери застосування
- 2.4. Картриджні фільтри: сучасні рішення для деревообробної галузі
- 2.5. Порівняльна характеристика фільтраційних систем

Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3. Порівняльний аналіз ефективності методів фільтрації на деревообробних підприємствах

- 3.1. Характеристика типового деревообробного підприємства та його викидів
- 3.2. Методика оцінки ефективності фільтраційних систем
- 3.3. Аналіз застосування різних типів фільтрів (тканинні, рукавні,

картриджні)

3.4. Економічні та екологічні аспекти впровадження систем фільтрації

3.5. Рекомендації щодо оптимізації систем очищення на деревообробних підприємствах

Висновки до розділу 3

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена оцінці та порівняльному аналізу методів фільтрації для зменшення викидів пилу та газів на деревообробних підприємствах. У роботі розглянуто основні джерела забруднення атмосферного повітря в деревообробній промисловості, їхній вплив на довкілля та здоров'я людини. Проаналізовано принципи роботи тканинних, рукавних та картриджних фільтрів, наведено їх переваги й недоліки. Проведено порівняння ефективності різних систем фільтрації з урахуванням технічних, економічних та екологічних факторів. Запропоновано рекомендації щодо вибору оптимальних систем очищення для деревообробних підприємств.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the assessment and comparative analysis of filtration methods for reducing dust and gas emissions at woodworking enterprises. The study examines the main sources of air pollution in the woodworking industry and their impact on the environment and human health. The principles of fabric, bag, and cartridge filters are analyzed, highlighting their advantages and disadvantages. A comparative evaluation of filtration systems is carried out, considering technical, economic, and ecological aspects. Recommendations are proposed for selecting optimal filtration systems for woodworking enterprises.

ВСТУП

Актуальність теми. Деревообробна промисловість є однією з найбільш розвинених галузей в Україні, однак її діяльність супроводжується значними екологічними проблемами. У процесі обробки деревини утворюються пилові та газоподібні викиди, які негативно впливають на довкілля та здоров'я людини. Пил дрібнодисперсної фракції проникає у дихальні шляхи, викликаючи професійні захворювання, а гази, зокрема формальдегід, оксиди азоту та вуглецю, сприяють забрудненню атмосфери. Ефективне очищення викидів від пилу і газів є важливим завданням екологічної безпеки деревообробних підприємств. Серед різних методів очищення особливе місце посідають фільтраційні системи, які забезпечують високий ступінь уловлювання забруднювальних речовин. Вибір оптимального типу фільтра та його правильної експлуатації дозволяє зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, підвищити безпеку працівників та відповідати сучасним екологічним стандартам України та ЄС. Таким чином, дослідження ефективності методів фільтрації та їх порівняльного аналізу має важливе наукове та практичне значення для сталого розвитку деревообробної промисловості.

Мета дослідження – оцінити ефективність та здійснити порівняльний аналіз методів фільтрації пилу і газів на деревообробних підприємствах з метою зменшення їх негативного впливу на навколишнє середовище та здоров'я людини.

Для досягнення мети визначено такі **завдання**:

1. Проаналізувати джерела утворення пилових і газоподібних викидів у деревообробній промисловості та їх вплив на довкілля.
2. Розглянути основні методи очищення газопилових викидів та оцінити їхню ефективність.

3. Дослідити класифікацію та принцип роботи різних типів фільтраційних систем (тканинні, рукавні, картриджні).

4. Провести порівняльний аналіз ефективності методів фільтрації на прикладі типового деревообробного підприємства.

5. Визначити екологічні та економічні переваги впровадження сучасних фільтраційних технологій.

6. Розробити практичні рекомендації щодо оптимізації систем очищення викидів на деревообробних підприємствах.

Об’єкт дослідження – процеси утворення та очищення пилових і газоподібних викидів на деревообробних підприємствах. **Предмет дослідження** – методи фільтрації та їх ефективність у зменшенні викидів пилу та газів.

Наукова новизна роботи полягає у системному підході до оцінки ефективності різних фільтраційних систем у деревообробній промисловості. Запропоновано порівняльний аналіз тканинних, рукавних та картриджних фільтрів з урахуванням їх конструктивних особливостей, експлуатаційної надійності, економічних витрат та екологічної результативності. В роботі також окреслено перспективи вдосконалення існуючих систем очищення шляхом впровадження інноваційних матеріалів і технологій.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для вибору оптимальних систем очищення газопилових викидів на деревообробних підприємствах України. Запропоновані рекомендації дозволяють підвищити екологічну безпеку виробництва, знизити ризики для здоров’я працівників, забезпечити відповідність чинним екологічним нормам та сприяти сталому розвитку галузі.

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи утворення та очищення викидів пилю і газів на деревообробних підприємствах

1.1. Джерела утворення пилю та газоподібних викидів у деревообробній промисловості [9-15]

Деревообробна промисловість є однією з найбільш екологічно навантажених галузей, оскільки технологічні процеси, пов'язані з механічною та хімічною обробкою деревини, супроводжуються утворенням значної кількості пилових та газоподібних викидів. Ці забруднювальні речовини різняться за своїм складом, дисперсністю, фізико-хімічними властивостями та рівнем впливу на довкілля і здоров'я людини.

Джерела утворення пилю

Пил у деревообробній промисловості формується переважно під час механічної обробки деревини, а саме:

- **Розпилювання деревини** (на стрічкових і дискових пилах) супроводжується утворенням тирси та дрібнодисперсного пилю, частинки якого можуть мати розмір від 1 до 100 мкм. Найбільш небезпечними вважаються фракції розміром до 10 мкм (PM10), які легко проникають у дихальні шляхи людини.

- **Фрезерування, стругання та шліфування** створюють значну кількість пилю дрібної дисперсності, що має здатність довго перебувати у повітрі виробничих приміщень. При шліфуванні пил може становити до 80 % усіх викидів, що утворюються на підприємстві.

- **Сушіння деревини** також може бути джерелом пилю, особливо при використанні теплових установок із недостатньою системою очищення димових газів.

Утворений деревний пил має органічну природу, проте це не робить його безпечним. Він може містити смолисті речовини, залишки хімікатів

(клеїв, лаків, просочувальних матеріалів), що значно посилює його токсичність.

Джерела утворення газоподібних викидів

Окрім пилу, деревообробні підприємства є значним джерелом газоподібних забруднювачів:

- **Формальдегід** – утворюється при виробництві та експлуатації деревинно-стружкових плит (ДСП), фанери, МДФ, де використовуються смоли на основі формальдегіду. Його випаровування особливо інтенсивне на стадіях пресування та сушіння.

- **Леткі органічні сполуки (ЛОС)** – виділяються під час лакофарбових робіт, нанесення клеїв та просочувальних матеріалів. Найчастіше серед них зустрічаються толуол, ксилол, ацетон та інші розчинники.

- **Оксиди азоту (NO_x) та оксиди вуглецю (CO)** – виникають під час роботи котелень та сушильних камер, які функціонують на викопному паливі або відходах деревини. При неповному згорянні палива концентрація CO може досягати небезпечних для здоров'я людини рівнів.

- **Діоксид сірки (SO₂)** – може з'являтися при використанні в якості палива вологих відходів деревини або низькоякісного вугілля у допоміжних теплогенеруючих установках.

- **Піролізні гази** – утворюються у процесі термічної переробки деревини (наприклад, при виробництві деревного вугілля). Вони містять значну кількість смолистих і канцерогенних сполук.

Комплексний характер викидів

Особливістю деревообробних підприємств є те, що пилові та газоподібні забруднювачі зазвичай утворюються одночасно. Наприклад, при роботі сушильних установок у повітря викидається не лише водяна пара, але

й продукти неповного згоряння палива та пилові частинки. Аналогічно, при шліфуванні деревини, покритої лаком, у повітря надходять і пил, і леткі органічні сполуки. Це суттєво ускладнює процес очищення викидів та вимагає застосування комбінованих методів фільтрації.

1.2. Вплив пилу та газів на довкілля і здоров'я людини

Викиди пилу та газоподібних речовин, характерні для деревообробної промисловості, становлять серйозну загрозу як для стану навколишнього середовища, так і для здоров'я працівників підприємств та населення, що проживає поблизу виробничих об'єктів. Їхній вплив має комплексний характер і проявляється у фізичних, хімічних та біологічних змінах природного середовища, а також у розвитку професійних і загальних захворювань людини.

Вплив пилу на довкілля

1. **Забруднення атмосферного повітря.** Деревний пил дрібної дисперсності довго зберігається в атмосфері, знижуючи її прозорість та погіршуючи мікроклімат населених пунктів. Особливо небезпечними є частинки розміром до 10 мкм (PM10) та до 2,5 мкм (PM2.5), які легко переносяться повітряними потоками на значні відстані.

2. **Накопичення на ґрунтах і водних об'єктах.** Осідаючи на поверхні ґрунту, пил змінює його фізико-хімічні властивості, утворюючи ущільнену кірку, яка знижує аерацію та погіршує умови росту рослин. При потраплянні у водні об'єкти пил спричиняє замулення водойм і зменшення концентрації розчиненого кисню.

3. **Вторинне забруднення.** Деревний пил часто містить залишки клеїв, лаків, просочувальних матеріалів та інших хімічних речовин, що

використовуються у виробництві. Це підвищує його токсичність і сприяє утворенню стійких органічних забруднювачів.

Вплив газоподібних викидів на довкілля

1. **Парниковий ефект.** Оксид вуглецю (CO) та вуглекислий газ (CO₂), що утворюються при спалюванні деревних відходів і викопного палива, є основними чинниками глобального потепління.

2. **Кислотні дощі.** Викиди діоксиду сірки (SO₂) та оксидів азоту (NO_x) вступають у реакцію з водяною парою атмосфери, утворюючи сірчану та азотну кислоти. Це призводить до кислотних опадів, які руйнують лісові екосистеми, погіршують родючість ґрунтів і прискорюють корозію будівельних матеріалів.

3. **Фотохімічне забруднення.** Леткі органічні сполуки (ЛОС) у поєднанні з оксидами азоту під дією сонячного випромінювання утворюють приземний озон та фотохімічний смог, що є серйозною проблемою для промислових регіонів.

4. **Забруднення водою і ґрунтів.** Осідання формальдегіду та інших токсичних речовин з атмосфери призводить до зміни хімічного складу ґрунтів і поверхневих вод, що негативно впливає на флору і фауну.

Вплив пилу на здоров'я людини

Деревний пил, особливо дрібнодисперсний, є серйозним професійним ризиком для працівників деревообробних підприємств:

- **Захворювання органів дихання.** Вдихання пилу спричиняє розвиток хронічного бронхіту, астми, алергічного риніту, пневмоконіозу. Частинки розміром менше 5 мкм проникають у легеневі альвеоли, де затримуються і викликають хронічні запальні процеси.

- **Алергічні реакції.** Деякі породи деревини (дуб, бук, червоне дерево) містять природні хімічні речовини, які можуть викликати дерматити та алергічні реакції при тривалому контакті.

- **Онкологічні ризики.** Міжнародне агентство з дослідження раку (IARC) відносить деревний пил до канцерогенів групи 1, доведених для людини. Встановлено підвищений ризик виникнення раку носової порожнини та верхніх дихальних шляхів у працівників деревообробної галузі.

Вплив газів на здоров'я людини

- **Формальдегід.** Викликає подразнення очей і слизових оболонок, головний біль, нудоту, алергічні реакції. При тривалому впливі може спричиняти онкологічні захворювання.

- **Оксиди азоту (NO_x).** Спричиняють подразнення дихальних шляхів, зниження функцій легенів, підвищують ризик розвитку серцево-судинних і респіраторних захворювань.

- **Оксид вуглецю (CO).** Блокує зв'язування кисню з гемоглобіном, що може призвести до гіпоксії, втрати свідомості і навіть смерті у випадку високих концентрацій.

- **Леткі органічні сполуки.** Багато з них (толуол, бензол, ксилол) мають виражену нейротоксичну дію, спричиняють головний біль, втому, порушення нервової системи. Бензол відноситься до канцерогенів.

1.3. Огляд методів очищення газопилових викидів: фільтрація, абсорбція, адсорбція, електрофільтрація

Очищення газопилових викидів є однією з ключових екологічних задач деревообробної промисловості, оскільки саме цей сектор виробництва характеризується значними обсягами утворення пилу, летких органічних

сполук і газоподібних забруднювачів. У процесах сушіння деревини, шліфування, різання, пресування деревинностружкових плит, а також у роботі пресів і лакофарбових ліній утворюються викиди, які містять деревний пил, смолисті частинки, пари формальдегіду, фенолу, леткі органічні речовини (ЛОР) тощо.

Для зменшення шкідливого впливу цих речовин на довкілля та здоров'я працівників застосовується комплекс технологій очищення. Найпоширенішими серед них є **фільтрація, абсорбція, адсорбція та електрофільтрація**. Кожен із методів має свої технічні та економічні особливості, що зумовлює вибір конкретного рішення залежно від типу виробництва, складу забруднювачів і вимог до якості очищення повітря.

Фільтрація

Фільтраційні системи — це найпоширеніший метод очищення газопилових потоків на деревообробних підприємствах. Принцип дії полягає у механічному відділенні твердих частинок з повітряного потоку шляхом його проходження через пористу перегородку (фільтрувальний матеріал).

Залежно від конструкції, виділяють **тканинні, рукавні та картриджні фільтри**. Тканинні фільтри зазвичай виготовляють із бавовняних або синтетичних матеріалів (поліестер, поліамід), тоді як рукавні системи оснащені довгими циліндричними рукавами, які забезпечують велику площу фільтрації та високу ефективність уловлювання пилу - до **99,5 %**.

Фільтрація має низку переваг:

- висока ефективність очищення;
- простота обслуговування;
- можливість регенерації фільтрувальних елементів;

- універсальність — ефективна як для грубодисперсного, так і для дрібнодисперсного пилу.

Недоліком є поступове зростання гідравлічного опору при забрудненні фільтра, що потребує періодичної очистки або заміни фільтрувального матеріалу.

Абсорбція

Абсорбція базується на **розчиненні газоподібних домішок у рідині-поглиначі**. Метод доцільно застосовувати для видалення **розчинних газів** - наприклад, формальдегіду, оксидів сірки, аміаку, хлороводню тощо. Абсорбери можуть бути насадковими, тарілчастими або пінними колонами, через які пропускається газовий потік, що контактує з рідиною (водою або спеціальним реагентом).

Для деревообробних підприємств найбільш актуальним є очищення газів, що утворюються при сушінні або склеюванні деревини, де присутні **пари формальдегіду**. У таких випадках використовують абсорбери з розчинами, які хімічно зв'язують формальдегід (наприклад, розчини аміаку або натрійсульфіту).

Переваги абсорбційного методу:

- можливість одночасного очищення від декількох газових компонентів;
- регулювання ефективності за рахунок зміни типу та концентрації розчину;
- можливість повторного використання реагентів після регенерації.

Недоліки: утворення **рідких відходів**, необхідність їх утилізації, а також обмеження щодо очищення газів із високою температурою.

Адсорбція

Адсорбція полягає у **поглинанні газових домішок твердою поверхнею сорбенту**. Як адсорбенти використовуються активоване вугілля, цеоліти, кремнеземи або спеціальні полімери. Цей метод особливо ефективний для очищення повітря від **летких органічних сполук (ЛОР)**, серед яких формальдегід, фенол, ацетон, толуол тощо.

Процес може бути **фізичною адсорбцією** (зв'язування молекул силами Ван-дер-Ваальса) або **хімічною** (утворення стійких хімічних сполук). На деревообробних підприємствах адсорбційні колони встановлюють після первинних фільтрів, що дозволяє вловлювати залишкові гази після механічного очищення.

Переваги адсорбційних систем:

- висока ефективність для низьких концентрацій шкідливих газів;
- можливість регенерації сорбенту термічними або паровими методами;
- компактність обладнання.

Серед недоліків — висока вартість адсорбентів і потреба у їх періодичній заміні, а також зниження ефективності при підвищеній вологості газу.

Електрофільтрація

Електрофільтрація (електростатичне очищення) застосовується для **вловлювання дрібнодисперсного пилу** (частинки розміром до 1 мкм). Принцип роботи полягає у **зарядженні частинок пилу в електричному полі** та їх осадженні на електродах, що мають протилежний заряд.

Електрофільтри бувають пластинчасті, трубчасті або комбіновані. У деревообробній промисловості вони використовуються на великих підприємствах з великими обсягами повітря, що очищується, наприклад — у цехах з виробництва деревинноволокнистих плит.

Переваги електрофільтрації:

- дуже висока ефективність очищення (до **99,9 %**);
- мала втрата тиску повітря;
- можливість автоматичного очищення електродів.

Основні недоліки — висока вартість обладнання, потреба у високовольтному живленні, складність обслуговування та підвищені вимоги до вологості й температури газового потоку.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика методів очищення

Метод	Основний принцип	Тип забруднювачів	Ефективність очищення, %	Основні переваги	Основні недоліки
Фільтрація	Механічне відділення частинок через пористий матеріал	Пил, аерозолі	95–99,5	Простота, ефективність, доступність	Підвищення опору, потреба у заміні фільтрів
Абсорбція	Розчинення газів у рідині	Формальдегід, SO ₂ , NH ₃	70–95	Одночасне очищення від кількох газів	Утворення стічних розчинів
Адсорбція	Поглинання газів твердим сорбентом	ЛОР, формальдегід, фенол	80–98	Висока ефективність, регенерація сорбенту	Вартість і обмеження вологості
Електрофільтрація	Осадження заряджених частинок в електричному полі	Дрібнодисперсний пил	98–99,9	Ефективність, низькі втрати тиску	Складність і висока вартість

Отже, вибір методу очищення газопилових викидів на деревообробних підприємствах має базуватися на **характері забруднення, необхідному ступені очищення, технічних можливостях підприємства та економічній доцільності**. У більшості випадків оптимальним є **комбіноване застосування фільтраційних, абсорбційних або адсорбційних методів**, що дозволяє досягти високого рівня екологічної безпеки виробництва.

1.4. Нормативно-правові вимоги щодо очищення викидів в Україні та ЄС [1-9]

Нормативно-правове регулювання очищення викидів в атмосферу є важливою складовою екологічної політики кожної держави. Його мета - забезпечити мінімізацію негативного впливу промислових підприємств на довкілля, дотримання стандартів якості атмосферного повітря та створення безпечних умов для життя і здоров'я людей. Для деревообробної промисловості, де утворюються значні обсяги пилю, летких органічних сполук, формальдегіду та інших газів, нормативне забезпечення визначає технічні вимоги до очищення викидів, гранично допустимі концентрації забруднюючих речовин, порядок контролю та відповідальність за порушення екологічних норм.

В Україні основним нормативним документом, який регулює охорону атмосферного повітря, є **Закон України “Про охорону атмосферного повітря”**. Він визначає правові, організаційні та економічні засади регулювання діяльності підприємств, що здійснюють викиди забруднюючих речовин. Згідно з цим законом, усі підприємства, включно з деревообробними, зобов'язані отримувати **дозвіл на викиди** забруднюючих речовин, у якому визначаються їх граничні обсяги, перелік джерел утворення та типи очисного обладнання.

Ключовим документом є також **Постанова Кабінету Міністрів України № 302 від 13 березня 2002 року “Про затвердження Порядку проведення та оплати робіт, пов’язаних з видачею дозволів на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами”**. Цей порядок визначає процедуру подання документів, узгодження із місцевими органами виконавчої влади та проведення оцінки впливу на довкілля (ОВД).

Деталізовані норми концентрацій забруднюючих речовин встановлюються у **Державних санітарних нормах атмосферного повітря населених місць (ДСН 173-96)**, де наведено **гранично допустимі концентрації (ГДК)** для формальдегіду, пилу деревини, фенолу, оксидів азоту, вуглецю та інших речовин. Наприклад, для формальдегіду ГДК у повітрі населених пунктів становить **0,035 мг/м³** (середньодобова) та **0,1 мг/м³** (разова). Для деревного пилу ГДК дорівнює **2 мг/м³**. Ці норми є орієнтиром для проектування систем очищення повітря на підприємствах, зокрема під час вибору фільтраційного обладнання.

Важливу роль відіграє і **Закон України “Про оцінку впливу на довкілля” (2017 р.)**, який вимагає проведення екологічної експертизи перед запуском або модернізацією деревообробних цехів. У рамках цієї процедури оцінюється характер, обсяги та склад викидів, ефективність систем очищення, а також можливі наслідки для екосистем і здоров’я населення.

На рівні галузевих стандартів діють також **Державні будівельні норми (ДБН) і державні стандарти (ДСТУ)**, які встановлюють вимоги до вентиляційних систем і пилогазоочисного обладнання. Зокрема, **ДБН В.2.5-67:2013 “Опалення, вентиляція та кондиціонування”** визначає технічні параметри систем видалення та очищення повітря, а **ДСТУ EN 779:2017** регламентує класифікацію фільтрів за ступенем очищення. Для проектування

систем очищення також використовуються **ГОСТ 12.1.005-88 “Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони”**, який регламентує концентрації пилу на робочих місцях.

У Європейському Союзі питання очищення промислових викидів регулюються на основі **Директиви 2010/75/ЄС “Про промислові викиди (інтегроване запобігання і контроль забруднення — ІРРС)”**. Цей документ зобов’язує підприємства застосовувати **найкращі доступні технології (НДТ, англ. BAT — Best Available Techniques)** для мінімізації викидів в атмосферу, воду та ґрунт. Для деревообробних підприємств у межах ЄС розроблено спеціальні **BREF-документи (BAT Reference Documents)**, які описують оптимальні технічні рішення для зменшення забруднення, включно з вимогами до фільтрів, циклонів, електрофільтрів, систем адсорбції та рекуперації розчинників.

Директива також вимагає регулярного **моніторингу викидів** і звітування перед компетентними органами. Контроль здійснюється за допомогою автоматизованих систем спостереження, які реєструють концентрації шкідливих речовин у реальному часі. Підприємства, які не дотримуються встановлених нормативів, зобов’язані впроваджувати коригувальні заходи або можуть бути тимчасово зупинені.

Крім того, у ЄС діють **Регламент (ЄС) № 1272/2008 (CLP)** щодо класифікації, маркування та пакування хімічних речовин, який стосується, зокрема, формальдегіду як канцерогенної сполуки. Підприємства, що використовують або утворюють такі речовини, повинні забезпечити їх безпечне поводження, мінімізувати викиди та впроваджувати замкнуті технологічні цикли.

Порівняльний аналіз українського та європейського законодавства свідчить, що Україна поступово гармонізує свої екологічні стандарти з

нормами ЄС. Основні відмінності полягають у ступені деталізації вимог до очищення викидів та рівні впровадження принципу “найкращих доступних технологій”. Водночас у межах Угоди про асоціацію з ЄС Україна зобов’язалася адаптувати свої нормативно-правові акти до європейських стандартів, що сприяє підвищенню екологічної ефективності деревообробної галузі.

Отже, нормативно-правова база України та ЄС створює чіткі рамки для функціонування деревообробних підприємств у сфері охорони атмосферного повітря. Її дотримання є не лише юридичним обов’язком, а й економічною необхідністю, оскільки застосування сучасних технологій очищення викидів дозволяє підприємствам знизити екологічні ризики, підвищити репутацію на ринку та забезпечити стале виробництво відповідно до принципів “зеленої економіки”.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи утворення та очищення газопилових викидів у деревообробній промисловості, їх вплив на довкілля, а також основні методи й нормативно-правові вимоги щодо їхнього контролю. Аналіз показав, що пилові та газові викиди є одним із головних екологічних чинників впливу деревообробних підприємств, оскільки процеси різання, шліфування, сушіння та склеювання деревини супроводжуються утворенням значної кількості дрібнодисперсного пилу, парів розчинників, формальдегіду та інших летких сполук.

Встановлено, що хімічний склад і концентрація цих викидів залежать від виду сировини, технології виробництва, типу обладнання та режимів роботи. Пил деревини є не лише шкідливим для довкілля, а й небезпечним для здоров’я працівників, оскільки здатний викликати алергічні реакції, захворювання дихальної системи та навіть онкологічні ураження за

тривалого впливу. Газоподібні домішки — формальдегід, оксиди азоту, чадний газ, леткі органічні сполуки — забруднюють атмосферу та беруть участь у формуванні фотохімічного смогу.

У результаті порівняння методів очищення газопилових викидів встановлено, що **фільтрація** є одним із найефективніших і найпоширеніших способів зменшення концентрацій твердих частинок у повітрі. Вона забезпечує високий ступінь очищення (до 99,9%) і може бути адаптована до різних типів виробництв. Методи **абсорбції** та **адсорбції** більш ефективні для очищення газових компонентів, особливо летких органічних сполук і формальдегіду, тоді як **електрофільтрація** поєднує високу ефективність із можливістю безперервної роботи на великих промислових об'єктах.

Огляд законодавства України та Європейського Союзу засвідчив, що обидві системи нормативного регулювання спрямовані на досягнення екологічної безпеки шляхом обмеження шкідливих викидів і впровадження найкращих доступних технологій. Проте в Україні існує потреба у вдосконаленні контролю за фактичним станом повітря, модернізації очисного обладнання та посиленні екологічного моніторингу. Європейська практика демонструє, що інтегрований підхід (на основі директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди) забезпечує більшу ефективність у зменшенні забруднення та стимулює підприємства до інновацій у сфері екологічних технологій.

Таким чином, теоретичний аналіз доводить, що впровадження сучасних систем фільтрації та газоочистки є ключовим напрямом підвищення екологічної ефективності деревообробних підприємств. У наступному розділі буде розглянуто класифікацію фільтраційних систем, їх конструктивні особливості, порівняльну ефективність і практичне застосування у виробничих умовах.

РОЗДІЛ 2. Методи фільтрації для зменшення пилових і газових викидів

2.1. Класифікація та принцип дії фільтраційних систем

Фільтраційні системи є ключовим елементом у процесі очищення повітря на деревообробних підприємствах, де утворюються значні обсяги пилу, стружки, летких органічних сполук і газоподібних домішок. Вибір типу фільтраційного обладнання визначається характером виробництва, обсягом повітря, що очищується, розміром частинок пилу, рівнем вологості, а також економічними можливостями підприємства. У сучасних умовах застосовується широкий спектр систем фільтрації, які відрізняються за конструкцією, принципом роботи, ефективністю та вартістю експлуатації.

Класифікація фільтраційних систем

За принципом дії фільтри поділяються на кілька основних груп:

1. **Механічні фільтри** – працюють на основі фізичного затримання частинок пилу на поверхні або в товщі фільтрувального матеріалу. До них належать:

- **сітчасті (грубого очищення)** – утримують великі частинки (стружку, тирсу);
- **тканинні фільтри (рукавні, мішкові)** – ефективно затримують дрібнодисперсний пил;
- **картриджні фільтри** – використовують гофровані фільтрувальні елементи для підвищення площі фільтрації при компактних розмірах.

2. **Інерційні фільтри (циклонного типу)** – очищують повітря завдяки відцентровій силі, яка відділяє тверді частинки від газового потоку. Такі системи ефективні для попереднього очищення повітря з великим вмістом пилу.

3. **Електростатичні фільтри (електрофільтри)** – ґрунтуються на принципі електризації частинок пилу і їх осадження на електродах під дією електричного поля. Вони забезпечують високий ступінь очищення (до 99,9%) і використовуються у великих деревообробних цехах або комбінатах.

4. **Фільтри з рідинним середовищем (мокрі скрубери, абсорбери)** – очищують повітря за рахунок поглинання пилу або газів водою чи хімічними розчинами. Такі системи одночасно можуть видаляти як тверді, так і газоподібні домішки.

5. **Адсорбційні фільтри** – використовуються для уловлювання газових домішок (формальдегід, фенол, леткі органічні сполуки) за допомогою активованого вугілля або цеолітів, які поглинають шкідливі речовини на своїй поверхні.

6. **Комбіновані системи очищення** – поєднують кілька принципів дії (наприклад, циклон + рукавний фільтр або мокрий скрубер + адсорбер), що дозволяє досягти комплексного очищення повітря від пилу та газів одночасно.

Принцип дії фільтраційних систем

Принцип роботи фільтраційних установок базується на процесі **розділення твердої і газоподібної фаз** за допомогою фізичних, електричних або хімічних методів. Основні етапи фільтрації включають:

- **Захоплення пилу або газів** з виробничого середовища через систему повітропроводів і вентиляторів;
- **Проходження через фільтрувальний елемент**, де відбувається осадження частинок;
- **Накопичення пилу** на поверхні або в осаджувальній камері;
- **Очищення фільтра** — механічним струшуванням, імпульсами стисненого повітря або водним промиванням;

- **Видалення очищеного повітря** назад у виробниче приміщення або в атмосферу відповідно до нормативів.

Для газових домішок, таких як формальдегід або фенол, використовуються **хімічні або фізико-хімічні механізми очищення**, що передбачають поглинання або адсорбцію шкідливих речовин на спеціальних сорбентах. При цьому очищення може бути одноразовим або циклічним (із регенерацією сорбенту).



Рис.1 Типова система фільтрації повітря [12-15]

Отже, сучасні фільтраційні системи охоплюють широкий спектр технологічних рішень, які дозволяють забезпечити ефективне очищення виробничого повітря відповідно до екологічних нормативів. Найкращі результати досягаються при **комбінуванні різних методів очищення** — механічного, електростатичного та хімічного, що забезпечує як видалення пилу, так і зменшення концентрацій токсичних газових домішок.

**Таблиця 2. Порівняльна характеристика типів
фільтраційних систем**

Тип фільтраційної системи	Основний принцип дії	Ефективність очищення, %	Сфера застосування	Переваги	Недоліки
Циклон	Відцентрове осадження	70–90	Попереднє очищення від грубих частинок	Простота конструкції, низька вартість	Не ефективний для дрібного пилу
Рукавний фільтр	Механічна фільтрація через тканину	95–99,9	Основне очищення повітря	Висока ефективність, придатний для дрібного пилу	Потребує регулярного очищення
Картриджний фільтр	Механічна фільтрація через гофровану поверхню	95–99	Цехи з обмеженим простором	Компактність, низьке енергоспоживання	Висока вартість картриджів
Електрофільтр	Осадження частинок під дією електричного поля	98–99,9	Великі деревообробні комбінати	Висока ефективність, безперервна робота	Висока вартість, потреба у кваліфікованому обслуговуванні
Мокрий скруббер	Поглинання частинок рідиною	90–98	Очищення змішаних викидів (пил + газів)	Одночасне очищення пилу і газів	Потребує утилізації забрудненої рідини
Адсорбційний фільтр	Поглинання газів сорбентом	85–99	Видалення формальдегіду, VOC	Висока ефективність для газів	Обмежений термін служби сорбенту

2.2. Тканинні фільтри: конструкція, ефективність та експлуатаційні особливості

Тканинні фільтри є одним із найпоширеніших і найефективніших методів очищення повітря від пилу в деревообробній промисловості. Вони поєднують простоту конструкції, високу ефективність затримання частинок і відносно низькі експлуатаційні витрати. Основний принцип їхньої роботи ґрунтується на **механічній фільтрації повітря через пористий матеріал**, який утримує тверді частинки пилу на своїй поверхні або в структурі волокон.

Конструкція тканинних фільтрів

Типова конструкція тканинного фільтра складається з таких основних елементів:

- **Корпус фільтра** — герметична металева камера, у якій розміщуються фільтрувальні елементи (рукави, мішки або панелі).

- **Фільтрувальні елементи (тканинні рукави або мішки)** - основна частина системи, через яку проходить забруднене повітря. Вони виготовляються з тканин різного типу: поліестеру, поліпропілену, скловолокна, акрилу або нетканих синтетичних волокон.

- **Система регенерації (очищення фільтрувальної тканини)** - забезпечує періодичне видалення осілого пилу. Може бути реалізована у вигляді:

- **механічного струшування** (вібраційні системи),
- **зворотного продування повітрям**,
- **імпульсного очищення (pulse jet)** за допомогою стисненого повітря.

- **Бункер для збору пилу**, у якому накопичуються тверді частинки після очищення фільтра.
- **Вентилятор та система повітропроводів**, що забезпечують циркуляцію повітря через фільтр.

Залежно від розміру та призначення, тканинні фільтри поділяють на **рукавні установки великої продуктивності** (для цехів і комбінатів) та **модульні системи** для локального очищення повітря від окремих верстатів чи технологічних ліній.

Принцип роботи тканинних фільтрів

Забруднене повітря надходить у камеру фільтра, де його потік рівномірно розподіляється між фільтрувальними елементами. Частинки пилу осідають на зовнішній поверхні тканини, утворюючи **пиловий шар (фільтраційний “торт”)**, який, своєю чергою, підвищує ефективність очищення, оскільки зменшує розмір пор у матеріалі. Після накопичення певної кількості пилу система регенерації періодично очищає тканину, відновлюючи її пропускну здатність.

Очищене повітря подається у вентиляційну систему або повертається у приміщення (за умови відповідності санітарним нормам), а зібраний пил видаляється в бункер для подальшої утилізації або переробки.

Матеріали фільтрувальних елементів

Ефективність роботи тканинного фільтра значною мірою залежить від типу фільтрувального матеріалу. Основні характеристики матеріалів наведено у таблиці.

Таблиця 3. Основні характеристики фільтрувальних матеріалів

Матеріал фільтру	Робоча температура, °С	Стійкість до вологи	Хімічна стійкість	Середній термін служби, міс.	Примітки
Поліестер (PES)	до 130	Висока	Середня	12–24	Найпоширеніший матеріал для деревообробних підприємств
Поліпропілен (PP)	до 100	Дуже висока	Висока	18–30	Стійкий до кислот і лугів
Арамід (Nomex)	до 200	Середня	Висока	24–36	Використовується для високотемпературних процесів
Скловолокно	до 250	Низька	Висока	30–48	Для спеціалізованих установок
PTFE (тефлон)	до 260	Висока	Дуже висока	36–60	Максимальна ефективність, але висока вартість

Для пилу деревини, який має середній розмір частинок 10–50 мкм, найкраще підходять **поліестерні або поліпропіленові фільтри**, що забезпечують високий рівень очищення (до 99,9%) і добру стійкість до вологи, смол та смоляних частинок.

Ефективність тканинних фільтрів. Тканинні фільтри забезпечують один із **найвищих ступенів очищення повітря** серед усіх механічних методів. Основні показники ефективності:

- **Ступінь очищення пилу — 95–99,9%;**

- **Концентрація пилу після очищення** — не перевищує 10 мг/м³ (що відповідає європейським екостандартам);
- **Витрати електроенергії** — у межах 1,5–3,5 кВт·год/1000 м³ повітря;
- **Середній термін служби фільтрувальних елементів** — від 1 до 5 років залежно від умов експлуатації.

Завдяки своїй ефективності тканинні фільтри використовуються на різних етапах виробництва: від локального очищення біля верстатів (фрезерування, шліфування) до централізованих систем аспірації в цехах.

Експлуатаційні особливості та рекомендації

1. **Регулярне очищення фільтрувальних елементів** є обов'язковою умовою стабільної роботи системи. При забрудненні тканини опір потоку повітря зростає, що знижує продуктивність системи.
2. **Підтримка оптимальної вологості повітря (40–60%)** запобігає налипанню смол і пилу на тканині.
3. **Моніторинг тиску та витрати повітря** дозволяє своєчасно визначати потребу в заміні фільтрувальних елементів.
4. **Вибір матеріалу** повинен враховувати температуру, тип пилу, його вологість і агресивність середовища.
5. **Зібраний пил** може бути повторно використаний як паливо (брикетування, спалювання в котлах), що знижує відходи і підвищує енергоефективність підприємства.

Висновки до підрозділу

Тканинні фільтри залишаються базовим рішенням для систем очищення повітря на деревообробних підприємствах завдяки їхній **високій ефективності, універсальності та економічності**. Вони здатні забезпечити досягнення нормативних показників концентрації пилу відповідно до вимог

українського та європейського законодавства. Незважаючи на потребу в регулярному обслуговуванні, сучасні автоматизовані системи регенерації (pulse-jet) дозволяють значно знизити трудові витрати та підвищити надійність роботи.

У наступному підрозділі буде розглянуто **рукавні фільтри** як одну з найпоширеніших реалізацій тканинних систем, їхні переваги, недоліки та специфіку застосування в умовах деревообробного виробництва.

2.3. Рукавні фільтри: переваги, недоліки та сфери застосування [9-15]

Рукавні фільтри є одними з найефективніших систем очищення повітря від пилу у деревообробній промисловості. Вони належать до групи тканинних фільтрів, проте відрізняються **конструктивним виконанням і способом очищення фільтрувальних елементів**. Завдяки високому ступеню очищення (до 99,9%) і широкому діапазону робочих параметрів рукавні фільтри використовуються як у великих деревообробних комбінатах, так і на середніх підприємствах.

Конструкція рукавних фільтрів

Основним елементом установки є **рукав - циліндричний фільтрувальний елемент**, виготовлений із тканини або нетканого матеріалу. Повітря, що містить пил, проходить крізь стінки рукавів, при цьому тверді частинки осідають на їхній зовнішній поверхні.

Типова рукавна установка складається з таких вузлів:

- **Корпус** із системою входу та виходу повітря;
- **Пакет фільтрувальних рукавів** (від кількох десятків до кількох сотень штук);
- **Рамна система або клітки**, що підтримують форму рукавів;

- **Система очищення (регенерації)** — забезпечує періодичне видалення пилу з поверхні рукавів;

- **Бункер для збору пилу;**

- **Вентилятор і система автоматики.**

Схема принципу дії рукавного фільтра:

Забруднене повітря → потрапляє в корпус фільтра - пил осідає на зовнішній поверхні рукавів → очищене повітря виходить через тканину - пил періодично струшується або здувається в бункер.

Принцип роботи. Рукавні фільтри працюють за принципом **механічного розділення твердої та газової фаз**. Коли повітря проходить через тканину, частинки пилу осідають на її поверхні, утворюючи шар пилу — “фільтраційний торт”. Цей шар, попри те що зменшує пропускну здатність тканини, **підвищує ефективність затримання дрібнодисперсного пилу**, оскільки виконує роль додаткового фільтра.

Щоб запобігти надмірному накопиченню пилу, застосовують різні методи **регенерації фільтрувальної поверхні**:

- **Імпульсна продувка стисненим повітрям (pulse-jet)** - найефективніша система, що очищує рукави автоматично під дією коротких імпульсів повітря.

- **Зворотне продування** — подача потоку повітря у зворотному напрямку для струшування пилу.

- **Механічне струшування** — використовується у малих фільтрах; полягає у вібрації або коливанні рукавів.

Таблиця 4. Типи рукавних фільтрів

Тип фільтра	Спосіб очищення	Продуктивність, м³/год	Особливості застосування
Pulse-jet	Імпульсна продувка стисненим повітрям	1 000–100 000	Найпоширеніший у деревообробній промисловості; автоматизований режим роботи
Reverse air	Зворотне продування повітрям	5 000–50 000	Менше навантаження на тканину, але нижча ефективність регенерації
Mechanica l shaker	Механічне струшування	до 10 000	Простота, дешевизна, але потребує ручного обслуговування
Modular bag filter	Комбінований (для локальних систем)	до 3 000	Використовується для очищення повітря від окремих верстатів

Матеріали фільтрувальних рукавів

Фільтрувальні рукави виготовляються з **високоякісних тканин або нетканих матеріалів**, стійких до дії смол, вологи та температур. Найпоширеніші матеріали:

- **Поліестер (PES)** — універсальний, має високу механічну міцність, робоча температура до 130 °С;

- **Поліпропілен (PP)** — висока хімічна стійкість, але нижча термостійкість;
- **Арамід (Nomex)** — використовується при температурах до 200 °С;
- **PTFE (тефлон)** — найвища ефективність очищення, але висока вартість.

Для деревообробних підприємств зазвичай застосовують **поліестерні рукави**, оскільки вони оптимальні за співвідношенням "ціна–довговічність–ефективність".

Переваги рукавних фільтрів

1. **Високий ступінь очищення** — до 99,9%, що відповідає найсуворішим європейським екологічним стандартам.
2. **Універсальність застосування** — ефективно працюють для широкого спектра пилу (деревний, цементний, металевий, полімерний тощо).
3. **Автоматизація процесу очищення** — сучасні системи мають електронне керування регенерацією, що мінімізує участь персоналу.
4. **Можливість повторного використання очищеного повітря у виробничих приміщеннях** (залежно від складу пилу).
5. **Низький рівень шуму** порівняно з циклонами або електрофільтрами.
6. **Тривалий термін служби** фільтрувальних елементів — від 2 до 5 років.

Недоліки рукавних фільтрів

1. **Необхідність регулярного технічного обслуговування** - потребують періодичної заміни рукавів або перевірки системи продування.
2. **Високі початкові інвестиції** порівняно з циклонами чи скруберами.

3. **Чутливість до вологості** — при перевищенні 70% можливе злипання або зволоження пилу, що знижує ефективність фільтрації.

4. **Підвищене енергоспоживання** через потребу у вентиляторі високого тиску.

5. **Ризик займання пилу** — деревний пил є вибухонебезпечним, тому потрібні антистатичні матеріали та іскрогасники.

Сфери застосування

Рукавні фільтри широко використовуються в таких галузях:

- **Деревообробна промисловість** — для очищення повітря від тирси, стружки, шліфувального пилу;

- **Фанерне та плитне виробництво** — очищення повітря від дрібнодисперсного пилу ДСП, МДФ, OSB;

- **Цементна, гіпсова та вапняна промисловість;**

- **Хімічна промисловість** — уловлювання полімерного пилу;

- **Металообробка** — очищення від абразивного пилу після шліфування;

- **Агропромисловість** — для пилу зерна, комбікормів тощо.

Ефективність роботи рукавного фільтра

У середньому, для деревообробного підприємства рукавний фільтр забезпечує такі показники:

- Концентрація пилу до очищення — **300–500 мг/м³**

- Концентрація після очищення — **до 10 мг/м³**

- Ефективність очищення — **понад 98–99,9%**

- Витрати електроенергії — **2–3,5 кВт·год/1000 м³ повітря**

Висновки до підрозділу

Рукавні фільтри є **оптимальним рішенням** для очищення повітря на деревообробних підприємствах, поєднуючи високу ефективність і відносну

простоту експлуатації. Вони дозволяють досягти нормативних значень викидів пилу згідно з вимогами ДСТУ та директив ЄС.

Незважаючи на потребу у технічному обслуговуванні та певні енергетичні витрати, сучасні автоматизовані системи типу **pulse-jet** забезпечують надійну роботу, низькі експлуатаційні витрати і стабільну ефективність протягом тривалого часу.

У наступному підрозділі буде розглянуто **картриджні фільтри**, які є еволюційним розвитком рукавних систем і відзначаються компактністю, високою ефективністю та зручністю обслуговування

2.4. Картриджні фільтри: сучасні рішення для деревообробної галузі [12-15]

Картриджні фільтри — це сучасний тип сухих систем очищення повітря, що поєднує в собі **високу ефективність фільтрації, компактність і зручність обслуговування**. Вони є логічним продовженням розвитку рукавних фільтрів, але замість гнучких рукавів використовують **жорсткі фільтрувальні картриджі**, які мають більшу площу фільтрації при менших габаритах.

Такі системи набули широкого поширення в деревообробній промисловості завдяки можливості ефективно очищати повітря від дрібнодисперсного пилу, що утворюється під час **шліфування, фрезерування, полірування та пресування деревинних матеріалів**.

Конструкція картриджних фільтрів

Картриджний фільтр складається з таких основних елементів:

- **Корпус із системою розподілу повітря** (забруднене повітря надходить знизу, очищене виходить зверху);

- **Фільтрувальні картриджі** — циліндричні елементи, виготовлені з гофрованого матеріалу (папір, синтетичне волокно, поліестер із тефлоновим покриттям);

- **Система регенерації** — очищення картриджів за допомогою імпульсної продувки стисненим повітрям;

- **Бункер для збору пилу;**

- **Вентилятор і система управління.**

Картриджі мають **гофровану структуру**, що збільшує площу фільтрації в кілька разів у порівнянні з традиційними рукавами. Один картридж може замінити до 10–15 рукавів, зберігаючи при цьому ефективність очищення на рівні 99,9%.

Принцип дії картриджного фільтра

1. Забруднене повітря надходить у нижню частину фільтра.
2. Потік проходить крізь фільтрувальні картриджі, де частинки пилу осідають на зовнішній поверхні.
3. Очищене повітря проходить крізь фільтрувальний матеріал і викидається через верхню частину установки.
4. Система **імпульсної продувки (Pulse Jet)** періодично очищає картриджі, видаляючи пил у спеціальний бункер.

Такий принцип роботи забезпечує **стабільну ефективність очищення без зупинки процесу**, що є особливо важливим для безперервного виробництва.

Таблиця 5. Типи фільтрувальних матеріалів для картриджів

Матеріал	Робоча температура, °С	Особливості	Застосування
Целюлозно-синтетичний папір	до 70	Дешевий, легкий, але менш стійкий до вологи	Сухі процеси шліфування
Поліестер (PES)	до 130	Стійкий до вологості та механічних пошкоджень	Загальне очищення повітря в цехах
Поліестер з PTFE-покриттям	до 130	Висока ефективність, низький опір потоку	Тонкий пил, фінішна шліфовка
Металеве волокно	до 250	Висока міцність, можливість регенерації нагрівом	Високотемпературні або вибухонебезпечні зони

Переваги картриджних фільтрів

1. **Компактність і висока продуктивність** — завдяки гофрованій структурі фільтрувального матеріалу.
2. **Висока ефективність очищення** — до 99,9%, навіть для пилу з частинками < 1 мкм.
3. **Низькі енергетичні витрати** — менший опір потоку порівняно з рукавними системами.
4. **Автоматизована система очищення** — імпульсна продувка працює без зупинки процесу.
5. **Простота обслуговування** — швидка заміна картриджів (зазвичай зверху або з боку, без розбирання корпусу).
6. **Довговічність** — термін служби картриджів становить 2–4 роки залежно від умов експлуатації.
7. **Можливість рециркуляції очищеного повітря**, що знижує втрати тепла у виробничих приміщеннях.

Недоліки картриджних фільтрів

1. **Обмеження за вологістю** — при підвищеній вологості пил може склеюватися на поверхні картриджа.
2. **Вища вартість фільтрувальних елементів** у порівнянні з рукавами.
3. **Чутливість до абразивного пилу** — потребують додаткового попереднього очищення (наприклад, циклону).
4. **Потреба у стабільному тиску стисненого повітря** для системи продувки.

Сфери застосування картриджних фільтрів

Картриджні фільтри використовуються у таких процесах:

- **Шліфування та полірування деревини, фанери, ДСП, МДФ;**

- Очищення повітря після ліній пресування плит;
- Збір пилу від транспортних систем (пневмотранспорту тирси);
- Фільтрація повітря в фарбувальних і лакувальних цехах;
- Локальні системи очищення для верстатів з ЧПК.

Таблиця 7 Порівняльна характеристика рукавних і картриджних фільтрів

Показник	Рукавні фільтри	Картриджні фільтри
Ступінь очищення	98–99,5%	99,9%
Розмір частинок, що затримуються	>2 мкм	>0,3 мкм
Габарити установки	Великі	Компактні
Енерговитрати	Вищі	Нижчі
Вартість обслуговування	Середня	Нижча
Рівень шуму	Середній	Низький
Сфера використання	Великі підприємства	Малі й середні цехи
Автоматизація очищення	Часто наявна	Повністю автоматизована

Ефективність роботи картриджних фільтрів (приклад розрахунку)

Припустимо, що на деревообробному підприємстві обсяг забрудненого повітря становить **20 000 м³/год** при концентрації пилу **300 мг/м³**.

Після очищення картриджним фільтром:

$$C_{\text{вих}} = 5 \text{ мг/м}^3$$

Ефективність очищення:

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}}} \times 100 = \frac{300 - 5}{300} \times 100 = 98,3\%$$

Тобто ефективність фільтра становить **98,3%**, що відповідає сучасним екологічним стандартам ЄС (гранична концентрація пилу для викидів - до 10 мг/м³).

Висновки до підрозділу

Картриджні фільтри є **інноваційним рішенням** для очищення повітря на деревообробних підприємствах, забезпечуючи найвищу ефективність серед усіх типів сухих фільтраційних систем. Їхні основні переваги - **компактність, низьке енергоспоживання, простота обслуговування та висока екологічна ефективність.**

Використання картриджних систем дозволяє не лише знизити викиди пилу до нормативних рівнів, але й покращити умови праці в цехах, підвищити ресурс обладнання та зменшити витрати на вентиляцію.

У наступному підрозділі буде проведено **порівняльний аналіз ефективності різних фільтраційних систем**, що застосовуються у деревообробній галузі, з метою визначення оптимального рішення для підприємств різного масштабу.

2.5. Порівняльна характеристика фільтраційних систем

Вибір оптимальної системи очищення повітря від пилу та газів на деревообробному підприємстві залежить від багатьох факторів: об'єму повітря, що підлягає очищенню, концентрації пилу, розміру частинок, температури газів, особливостей технологічного процесу та економічних можливостей підприємства. У цьому підрозділі розглянуто порівняльні характеристики основних фільтраційних систем — тканинних, рукавних, картриджних, а також допоміжних методів (електрофільтрація, абсорбція, адсорбція), які можуть застосовуватись у комбінації.

Загальні критерії оцінки фільтраційних систем

Для об'єктивного аналізу ефективності систем фільтрації доцільно використовувати такі критерії:

- **Ступінь очищення повітря (ефективність):** показує, який відсоток пилу або газоподібних домішок видаляється з потоку.
- **Опір потоку повітря:** характеризує енергозатрати системи на подолання опору фільтруючого матеріалу.
- **Вартість експлуатації та обслуговування:** включає витрати на заміну фільтрів, очищення, енергоспоживання.
- **Довговічність елементів:** визначає термін служби фільтруючих матеріалів.
- **Гнучкість у застосуванні:** можливість використання при різних технологічних процесах.

Таблиця 8. Порівняльна таблиця основних типів фільтраційних систем

Тип фільтраційної системи	Ефективність очищення, %	Основні переваги	Основні недоліки	Орієнтовна вартість експлуатації	Рекомендована сфера застосування
Тканинні фільтри	90–95	Простота конструкції, низька ціна, зручність заміни	Швидке зношення тканини, не придатні для високих температур	Низька	Невеликі цехи, локальні аспіраційні системи
Рукавні фільтри	95–99	Висока ефективність, придатність для великих потоків повітря	Висока вартість, потребують регулярного очищення	Середня	Великі деревообробні підприємства, комбінати
Картриджні фільтри	98–99,5	Компактність, тривалий термін служби, легке обслуговування	Чутливість до вологості, вища початкова вартість	Середня/висока	Лінії шліфування, полірування, сушильні цехи

Електрофільтри	95–99	Ефективні при великих об'ємах газів, низький опір потоку	Висока вартість і складність обслуговування	Висока	Енергомісткі деревообробні виробництва
Абсорбційні системи	80–95	Можливість очищення від газоподібних домішок	Потреба у реагентах, утворення стічних вод	Висока	Комбіновані системи для очищення повітря і води
Адсорбційні системи	85–98	Висока ефективність при очищенні газів	Складність регенерації адсорбентів	Висока	Для вловлення летких органічних сполук (ЛОС)

Порівняльний аналіз показує, що **рукавні та картриджні фільтри** є найбільш ефективними рішеннями для сучасних деревообробних підприємств. Вони забезпечують високий рівень очищення при відносно помірних експлуатаційних витратах. **Тканинні фільтри** доцільно застосовувати у невеликих майстернях або для локальних систем, де концентрація пилу не перевищує нормативних меж. **Електрофільтри та комбіновані абсорбційно-адсорбційні системи** більш ефективні для великих промислових комплексів, де потрібно одночасно очищати повітря від твердих частинок і газів.

Для підвищення загальної екологічної ефективності рекомендується **поєднувати кілька методів очищення**, наприклад:

- картриджна фільтрація + електрофільтр (для тонкого очищення повітря);
- рукавний фільтр + адсорбційна установка (для зниження концентрації летких органічних сполук);
- тканинна фільтрація + система зрошення (для пилопригнічення на вході).

Таким чином, вибір системи повинен базуватись на **комплексному підході**, який враховує не лише технічну ефективність, але й економічні, екологічні та експлуатаційні чинники.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було розглянуто основні типи та принципи дії фільтраційних систем, що застосовуються для очищення повітря від пилу та газів на деревообробних підприємствах. Детальний аналіз показав, що процес фільтрації є ключовим елементом систем екологічного захисту, оскільки саме на цьому етапі забезпечується максимальне зниження концентрації шкідливих речовин перед їх викидом у довкілля.

Було встановлено, що **тканинні фільтри** залишаються найпростішим та найдоступнішим способом очищення, однак вони мають обмежену довговічність і не придатні для високотемпературних газів. Їх доцільно застосовувати у невеликих виробництвах або як допоміжні елементи локальних аспіраційних систем.

Рукавні фільтри продемонстрували високу ефективність (до 99%) при очищенні великих обсягів повітря з високою концентрацією деревного пилу. Вони є універсальним рішенням для більшості деревообробних

підприємств, хоча потребують регулярного технічного обслуговування та очищення рукавів від пилу.

Картриджні фільтри є сучасною альтернативою традиційним рукавним системам. Вони відзначаються компактністю, високим ступенем очищення та низькими експлуатаційними витратами. Їх застосування особливо ефективно у приміщеннях із підвищеною концентрацією дрібнодисперсного пилу (шліфування, полірування, фрезерування).

Порівняльний аналіз різних типів фільтраційних систем дозволив зробити висновок, що **найкращі результати досягаються при використанні комбінованих технологій** — наприклад, поєднання картриджних або рукавних фільтрів із електрофільтрами чи адсорбційними установками. Такий підхід забезпечує не лише ефективне очищення від твердих частинок, а й зниження концентрації шкідливих газоподібних компонентів, у тому числі формальдегіду.

Також встановлено, що ефективність будь-якої системи фільтрації значною мірою залежить від **своєчасного технічного обслуговування, правильного підбору фільтруючого матеріалу, оптимізації швидкості потоку повітря та контролю стану фільтрів.**

Отже, результати аналізу підтверджують, що впровадження сучасних фільтраційних технологій є **невід'ємною частиною екологічної стратегії деревообробних підприємств**, яка дозволяє не лише дотримуватись нормативів викидів, а й підвищувати рівень екологічної безпеки виробництва, покращуючи умови праці персоналу та знижуючи негативний вплив на довкілля.

РОЗДІЛ 3. Порівняльний аналіз ефективності методів фільтрації на деревообробних підприємствах [9-15]

3.1. Характеристика типового деревообробного підприємства та його викидів

Деревообробна промисловість є одним із провідних секторів переробної галузі України, забезпечуючи виготовлення пиломатеріалів, меблів, фанери, деревинно-плитних матеріалів та інших виробів. Типове деревообробне підприємство характеризується комплексом технологічних процесів, у результаті яких утворюються значні обсяги пилу, газів і летких органічних сполук.

Основними технологічними етапами є:

- **Розкрязування та розпилювання деревини**, що супроводжується утворенням крупнодисперсного деревного пилу.
- **Сушіння деревини** — процес, під час якого відбувається виділення смол, летких органічних речовин та газоподібних компонентів, зокрема формальдегіду.
- **Фрезерування, шліфування та стругання**, що спричиняють інтенсивне утворення дрібнодисперсного пилу.
- **Пресування та склеювання деревинних плит**, у результаті чого утворюються газові викиди формальдегіду, фенолів та інших хімічних сполук.
- **Фарбування та лакування**, під час яких у повітря надходять леткі органічні сполуки (ЛОС), такі як ацетон, толуол, ксилол.

Основними джерелами викидів є **аспіраційні системи, сушильні камери, пресове обладнання та лакофарбові дільниці**. Залежно від масштабу виробництва, середній обсяг повітря, що підлягає очищенню, становить від 5 000 до 50 000 м³/год.

За даними екологічних досліджень, структура забруднень типового деревообробного підприємства може мати такий вигляд:

- пи́л деревини - **55–65%**,
- леткі органічні сполуки - **20–25%**,
- формальдегід та його похідні - **5–10%**,
- інші газоподібні домішки (CO, NO_x, смолисті речовини) - **до 10%**.

Найбільшу екологічну небезпеку становлять саме **дрібнодисперсні частинки пилу (менше 10 мкм)**, які здатні проникати у легені людини, та **формальдегід**, який має канцерогенні властивості. Викиди цих речовин, за відсутності ефективних систем очищення, можуть суттєво погіршувати якість атмосферного повітря на території підприємства і прилеглих житлових зон.

У сучасних умовах деревообробні підприємства впроваджують різні типи **фільтраційних систем**, які інтегруються у вентиляційні або аспіраційні мережі. Найпоширенішими є **рукавні, картриджні та циклонні фільтри**, а також комбіновані системи, що поєднують фільтрацію із електростатичним або адсорбційним очищенням.

Для оцінки ефективності систем фільтрації важливо враховувати такі параметри:

- **концентрацію пилу на вході та виході з фільтра,**
- **ступінь очищення (%),**
- **енергоспоживання системи,**
- **витрати на обслуговування,**
- **тривалість експлуатації фільтруючих елементів.**

Таким чином, типове деревообробне підприємство є **джерелом комплексних забруднень повітряного середовища**, що потребує

застосування ефективних технологій очищення. Вибір системи фільтрації повинен базуватись на поєднанні технічної ефективності, економічної доцільності та екологічної безпеки, що і стане предметом подальшого аналізу у наступних підрозділах.

3.2. Методика оцінки ефективності фільтраційних систем

Оцінка ефективності фільтраційних систем на деревообробних підприємствах є ключовим етапом екологічного аналізу, який дозволяє визначити реальний ступінь очищення повітря від пилу та газоподібних домішок, а також оцінити доцільність використання конкретних технологічних рішень. Ефективність фільтраційних систем визначає не лише екологічну безпеку підприємства, а й рівень енергоспоживання, економічні витрати, стабільність роботи обладнання та відповідність нормативним вимогам України та ЄС.

Загальні принципи оцінки ефективності

Методика оцінки базується на **порівнянні концентрації забруднюючих речовин на вході та виході з фільтраційної системи**, тобто до і після очищення. Основним кількісним показником є **ступінь очищення (η)**, який обчислюється за формулою:

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\%$$

де:

- C_1 - концентрація пилу або газоподібних речовин до очищення (мг/м³);
- C_2 - концентрація після очищення (мг/м³);
- η - ефективність очищення, %.

Для різних типів фільтрів ефективність може варіюватися у таких межах:

- **циклонні фільтри** — 70–90%;
- **рукавні фільтри** — 95–99%;
- **картриджні фільтри** — 98–99,5%;
- **електрофільтри** — до 99,9%;
- **комбіновані системи** (фільтрація + адсорбція або електростатичне очищення) — понад 99,9%.

Параметри, що впливають на ефективність

Ефективність роботи системи залежить від комплексу технічних, експлуатаційних і фізико-хімічних факторів:

- **швидкість потоку повітря:** при надмірно високій швидкості дрібнодисперсний пил може проходити крізь фільтр, знижуючи ефективність;
- **розмір частинок пилу:** більші частинки осідають легше, тоді як дрібні вимагають більш щільних фільтрувальних матеріалів;
- **вологість і температура газопилової суміші,** що впливають на опір руху повітря та властивості фільтрувальних матеріалів;
- **ступінь забруднення фільтра:** накопичення пилу збільшує аеродинамічний опір і знижує продуктивність системи;
- **тип фільтрувального матеріалу** — поліестер, поліпропілен, склотканина або синтетичні мембрани;
- **система регенерації** — способи очищення фільтра (зворотне продування, вібрація, імпульсне очищення).

Послідовність проведення оцінки

Оцінка ефективності фільтраційної системи проводиться у кілька етапів:

1. **Визначення вихідних даних** — встановлюються обсяги повітря, що очищується, характеристики пилу (щільність, розмір частинок, вологість), а також робочі параметри системи.

2. **Відбір проб повітря** — здійснюється на вході та виході з фільтра. Для цього використовують аспіраційні прилади або портативні пиломіри.

3. **Лабораторний аналіз** — визначається концентрація пилу, летких органічних сполук (ЛОС) або формальдегіду.

4. **Розрахунок ефективності очищення (η)** за вищенаведеною формулою.

5. **Оцінка стабільності роботи** — проводиться моніторинг ефективності протягом певного періоду експлуатації (наприклад, 1–3 місяці).

6. **Порівняння з нормативами** — результати порівнюються з гранично допустимими концентраціями (ГДК) шкідливих речовин, встановленими законодавством України та ЄС.

Приклад розрахунку ефективності

Розглянемо приклад оцінки ефективності рукавного фільтра на деревообробному підприємстві:

**Таблиця 10. Оцінка ефективності рукавного фільтра на
деревообробному підприємстві [12]**

Показник	Позначення	Значення
Концентрація пилу до фільтрації	C_1	240 мг/м ³
Концентрація пилу після фільтрації	C_2	5 мг/м ³
Продуктивність системи	Q	20 000 м ³ /год
Тривалість роботи	t	10 год/добу

Ефективність очищення:

$$\eta = \frac{240 - 5}{240} \times 100 = 97,9\%$$

Отже, рукавний фільтр забезпечує очищення повітря від пилу майже на **98%**, що відповідає сучасним екологічним вимогам.

Додатково можна визначити масу вилученого пилу (M) за формулою:

$$M = Q \times (C_1 - C_2) \times t \times 10^{-6}$$

$$M = 20\,000 \times (240 - 5) \times 10 \times 10^{-6} = 47\,000 \text{ г} = 47 \text{ кг/добу}$$

Таким чином, за добу система запобігає викиду **приблизно 47 кг деревного пилу** в атмосферу.

Комплексна оцінка ефективності

Окрім показників ступеня очищення, доцільно враховувати й інші критерії:

- **енергетичну ефективність** (кВт·год на 1000 м³ очищеного повітря);
- **економічну ефективність** — витрати на обслуговування, заміну фільтрів, споживання енергії;
- **екологічний ефект** — зменшення викидів твердих частинок та шкідливих газів, покращення якості повітря у виробничих приміщеннях.

Комплексна оцінка дозволяє визначити оптимальну фільтраційну систему для конкретного деревообробного підприємства, враховуючи його масштаби, тип продукції, технологічні процеси та екологічні вимоги.

Отже, застосування методики оцінки ефективності фільтраційних систем дає змогу не лише **кількісно виміряти рівень очищення**, а й **визначити напрямки вдосконалення систем екологічного захисту**, що сприятиме сталому розвитку деревообробної галузі.

3.3. Аналіз застосування різних типів фільтрів (тканинні, рукавні, картриджні)

У процесі експлуатації деревообробних підприємств використовується широкий спектр систем очищення повітря від пилу, які відрізняються конструкцією, принципом дії, рівнем ефективності, експлуатаційними характеристиками та вартістю обслуговування. Найбільш поширеними є **тканинні, рукавні та картриджні фільтри**, кожен із яких має свої особливості, переваги та сфери застосування.

1. Тканинні фільтри

Тканинні фільтри — це найбільш проста форма фільтраційних пристроїв, які базуються на принципі **механічного затримання частинок пилу** на поверхні фільтрувального матеріалу (бавовняна, синтетична або

склотканина). Вони використовуються для очищення повітря з помірною концентрацією пилу (до 20–30 г/м³).

Переваги тканинних фільтрів:

- низька вартість виготовлення та обслуговування;
- простота конструкції;
- можливість використання у малих та середніх системах аспірації;
- придатність для видалення пилу середньої фракції.

Недоліки:

- невисока термостійкість (до 120 °С);
- швидке засмічення тканини при дрібнодисперсному пилу;
- необхідність частого ручного очищення або заміни фільтра.

У деревообробній промисловості такі фільтри застосовуються переважно **на ділянках розпилювання, шліфування або різання**, де утворюється пил середнього розміру.

2. Рукавні фільтри

Рукавні фільтри є **найпоширенішим типом систем очищення повітря** у деревообробній галузі. Вони працюють за принципом глибинної фільтрації: запилене повітря проходить крізь пористу тканину рукавів, де частинки пилу осідають на внутрішній або зовнішній поверхні фільтра.

Основними матеріалами для рукавів є **поліестер, поліпропілен, нейлон, а також термостійкі композити**, що дозволяє використовувати їх при температурах до 250 °С.

Переваги рукавних фільтрів:

- дуже висока ефективність очищення (до 99–99,5%);
- здатність утримувати дрібнодисперсний пил (<1 мкм);
- можливість автоматичного очищення рукавів (пневмоімпульсна або зворотно-потоківна система);

- довгий термін служби (до 2–3 років).

Недоліки:

- високий гідравлічний опір потоку;
- потреба у періодичній регенерації фільтрів;
- більші енергетичні витрати у порівнянні з іншими типами.

Рукавні фільтри доцільно застосовувати **на великих деревообробних підприємствах**, де обсяг запиленого повітря перевищує 10 000–50 000 м³/год, а концентрація пилу — висока.

3. Картриджні фільтри

Картриджні фільтри — це **сучасний різновид фільтраційних систем**, який поєднує високу ефективність очищення з компактністю конструкції. Принцип їхньої дії подібний до рукавних систем, проте фільтраційна поверхня виконана у вигляді **гофрованих картриджів**, що забезпечує більшу площу при меншому об'ємі установки.

Фільтруючі елементи виготовляються з **нанопористих матеріалів**, іноді з антистатичним або водовідштовхувальним покриттям.

Переваги картриджних фільтрів:

- дуже висока ефективність (до 99,9%);
- компактність та зручність у монтажі;
- низькі витрати енергії;
- автоматичне очищення за допомогою імпульсів стисненого повітря;
- зменшення рівня шуму при роботі.

Недоліки:

- висока початкова вартість обладнання;
- чутливість до підвищеної вологості повітря;
- потреба у стабільному тиску повітря для системи регенерації.

Картриджні фільтри найчастіше використовуються на ділянках шліфування, полірування, лакування та різання MDF, HDF, ДСП, де важливо затримувати дрібнодисперсні частинки пилу та леткі органічні сполуки.

4. Порівняльна характеристика

Для зручності порівняння наведемо таблицю з основними технічними та експлуатаційними характеристиками різних типів фільтрів:

Таблиця 12. Оцінка ефективності рукавного фільтра на деревообробному підприємстві

Показник	Тканинні фільтри	Рукавні фільтри	Картриджні фільтри
Ефективність очищення, %	85–95	95–99,5	98–99,9
Робоча температура, °С	до 120	до 250	до 200
Обслуговування	ручне очищення	автоматична регенерація	імпульсна регенерація
Стійкість до вологості	низька	середня	висока (з покриттям)
Вартість встановлення	низька	середня	висока
Тривалість служби	до 1 року	2–3 роки	3–5 років
Підходить для	малих цехів	середніх і великих підприємств	точкових систем аспірації та чистих зон

5. Аналіз результатів

Проведений порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок, що **найкращим рішенням для сучасних деревообробних підприємств є використання рукавних або картриджних фільтрів**, залежно від умов експлуатації та типу пилу.

- Рукавні фільтри є **універсальним і перевіреним рішенням**, особливо для підприємств із великим обсягом виробництва. Вони гарантують стабільну ефективність навіть за високих концентрацій пилу.

- Картриджні фільтри — це **більш інноваційний варіант**, який дозволяє зменшити енергоспоживання, забезпечити високий рівень очищення і знизити потребу в обслуговуванні.

- Тканинні фільтри залишаються актуальними для **невеликих виробництв або локальних зон очищення**, де не потрібна складна автоматика.

У перспективі оптимальним напрямом розвитку є **комбіновані фільтраційні системи**, у яких картриджні фільтри поєднуються з електростатичними або адсорбційними модулями. Це забезпечує не лише зниження пилових частинок, але й ефективне очищення від летких органічних сполук, зокрема формальдегіду, що є характерним для деревообробних підприємств.

Таким чином, вибір типу фільтра повинен здійснюватися з **урахуванням технологічних особливостей виробництва, обсягів повітря, економічних можливостей та екологічних пріоритетів підприємства**, що дозволить забезпечити баланс між ефективністю очищення, витратами та безпекою навколишнього середовища.

3.4. Економічні та екологічні аспекти впровадження систем фільтрації [14-17]

Впровадження сучасних фільтраційних систем на деревообробних підприємствах є не лише технологічно необхідним, але й **економічно доцільним та екологічно виправданим кроком**. Ефективна система очищення повітря дозволяє підприємствам дотримуватися вимог природоохоронного законодавства, зменшувати ризики штрафів, підвищувати рівень безпеки працівників і формувати позитивний екологічний імідж компанії.

1. Економічні аспекти

Основні економічні переваги впровадження фільтраційних систем полягають у **зниженні втрат матеріалів, зменшенні витрат на утилізацію пилу, оптимізації споживання енергії та підвищенні ефективності виробництва**.

Розглянемо приклад розрахунку **економічної ефективності встановлення рукавного фільтра** на середньому деревообробному підприємстві з обсягом аспірації 30 000 м³/год.

**Таблиця 13. Оцінка ефективності рукавного фільтра на
деревообробному підприємстві**

Показник	Одиниця виміру	До впровадження	Після впровадження	Економічний ефект
Концентрація пилу у повітрі	мг/м ³	800	50	-93,75%
Втрати деревного пилу (сировини)	кг/рік	12 000	1 000	-11 000
Собівартість 1 кг деревного пилу	грн/кг	1,2	—	—
Економія матеріалів	грн/рік	—	—	13 200
Витрати на обслуговування фільтра	грн/рік	—	—	7 000
Річний економічний ефект	грн/рік	—	—	6 200
Термін окупності установки	років	—	—	2,8

Таким чином, встановлення ефективної фільтраційної системи дозволяє підприємству повернути вкладені інвестиції менш ніж за три роки, при цьому забезпечуючи стабільне зниження концентрації пилу у повітрі робочої зони.

Крім того, економічні вигоди включають:

- **зменшення простоїв обладнання** через накопичення пилу;

- **зниження витрат на ремонт систем вентиляції та аспірації;**
- **збереження здоров'я працівників,** що опосередковано знижує витрати на лікарняні та підвищує продуктивність праці;
- **можливість повторного використання пилю як вторинної сировини** (для виробництва брикетів або ДСП).

2. Екологічні аспекти [17]

З екологічної точки зору, впровадження фільтраційних систем має ключове значення для **зниження антропогенного навантаження на атмосферу,** особливо в регіонах із розвинутою деревообробною промисловістю.

Основні екологічні переваги:

- **Зменшення запиленості повітря** в зоні розташування підприємства, що позитивно впливає на здоров'я населення та довкілля.
- **Скорочення викидів формальдегіду та його похідних,** які адсорбуються частинками пилю та можуть поширюватися на значні відстані.
- **Зниження ризику забруднення ґрунтів і водних об'єктів,** оскільки очищене повітря не містить значних кількостей пилю, що осідає у навколишньому середовищі.
- **Можливість вторинної переробки пилю,** що відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку.

Екологічний ефект можна оцінити за формулою:

$$E_{\text{екол}} = (C_1 - C_2) \times Q \times T$$

де:

$E_{\text{екол}}$ - зменшення маси забруднюючих речовин, кг/рік;

C_1 - концентрація пилю до очищення, мг/м³;

C_2 - концентрація пилю після очищення, мг/м³;

Q - витрата повітря, м³/год;

T - час роботи системи, год/рік.

Підставимо умовні значення для рукавного фільтра:

$C_1=800$ мг/м³,

$C_2=50$ мг/м³,

Q=30 000 м³/год,

T=4 000 год/рік.

$$E_{\text{екол}} = (800 - 50) \times 30\,000 \times 4\,000 / 10^6 = 90\,000 \text{ кг/рік}$$

Отже, завдяки використанню рукавного фільтра підприємство зменшує річні викиди пилу на **90 тонн**, що є значним внеском у покращення екологічного стану повітряного басейну регіону.

3. Соціально-економічний ефект

Окрім безпосередніх економічних та екологічних переваг, впровадження систем фільтрації створює **довгостроковий соціальний ефект**, зокрема:

- поліпшення умов праці та зниження професійних захворювань;
- підвищення екологічної культури серед персоналу;
- покращення репутації підприємства перед контролюючими органами та громадськістю;
- можливість участі у міжнародних програмах екомодернізації та “зеленого виробництва”.

4. Висновок

Загалом, аналіз показує, що **впровадження сучасних фільтраційних систем на деревообробних підприємствах** є економічно вигідним, екологічно безпечним і соціально значущим рішенням. Рукавні та картриджні фільтри забезпечують оптимальний баланс між витратами,

ефективністю очищення та стабільністю роботи, дозволяючи підприємствам не лише відповідати екологічним стандартам України та ЄС, а й підвищувати власну конкурентоспроможність на міжнародному ринку.

3.5. Рекомендації щодо оптимізації систем очищення на деревообробних підприємствах

Ефективна система очищення повітря на деревообробних підприємствах має ґрунтуватися не лише на виборі сучасних фільтраційних технологій, а й на комплексному підході до **організації, моніторингу та модернізації** усіх процесів, пов'язаних із утворенням, транспортуванням і видаленням пилу та газоподібних викидів.

1. Організаційно-технічні рекомендації

1. Проведення регулярного аудиту систем очищення

Рекомендується щонайменше раз на рік здійснювати технічний аудит стану фільтраційного обладнання, повітропроводів, аспіраційних систем, а також проводити заміри концентрацій пилу у робочій зоні та на межі санітарно-захисної зони підприємства. Це дозволяє своєчасно виявляти втрату ефективності фільтрів або несправності в системі.

2. Оптимізація параметрів повітряного потоку Ефективність очищення залежить від правильного співвідношення об'єму повітря, що подається на фільтр, і його фільтраційної площі. Надмірна швидкість призводить до швидкого зношування фільтрувальних елементів, тоді як занадто низька – до зниження продуктивності аспіраційної системи. Рекомендується підтримувати швидкість повітряного потоку на рівні **0,8–1,2 м/с** у каналах і **1,5–2,0 м/с** на вході в фільтраційний блок.

3. Використання систем автоматичного очищення фільтрів

Рукавні та картриджні фільтри доцільно оснащувати системами імпульсного

продування стисненим повітрям, що дозволяє підтримувати стабільну ефективність очищення без ручного втручання.

4. Раціональне розміщення аспіраційних зон

Важливо забезпечити **локальне відсмоктування пилу** безпосередньо в місцях його утворення — біля фрез, пил, шліфувальних машин. Це значно знижує навантаження на загальну систему вентиляції та мінімізує запилення робочої зони.

2. Технологічні рекомендації

1. **Комбінування фільтраційних методів** Найкращі результати забезпечує **багатоступеневе очищення** — наприклад, комбінація циклона як попереднього етапу та рукавного або картриджного фільтра як основного. Це дозволяє зменшити навантаження на фільтрувальні елементи, подовжити їхній термін служби та знизити витрати на обслуговування.

2. Використання енергоефективних вентиляторів та частотного регулювання

Застосування вентиляторів із частотними перетворювачами (VFD) дає змогу регулювати продуктивність системи залежно від навантаження на виробництві, що зменшує споживання електроенергії до **20–30%**.

3. **Підбір оптимального фільтрувального матеріалу** Для деревообробних підприємств доцільно використовувати **антистатичні синтетичні матеріали** або **PTFE-мембрани**, які мають високу стійкість до механічного зношування та вологості, забезпечуючи ступінь очищення до **99,9%**.

4. **Рециклінг зібраного пилу** Зібраний пил можна використовувати як вторинну сировину для виробництва **брикетів, пелет** або **деревинно-стружкових плит**, що не лише зменшує кількість відходів, а й створює додаткову економічну вигоду.

3. Екологічно-економічні рекомендації

1. **Впровадження систем екологічного моніторингу** Доцільно інтегрувати автоматизовані системи контролю параметрів викидів (АСУ ВПЕ), які дозволяють у реальному часі відстежувати концентрацію пилу та газів, температуру, вологість повітря тощо. Це підвищує екологічну прозорість підприємства та дозволяє швидко реагувати на відхилення.

2. **Поступовий перехід на “зелені” технології** Використання енергоефективних двигунів, заміна застарілих фільтрів на модульні конструкції, перехід на відновлювані джерела енергії (наприклад, використання власних відходів як біопалива) сприяє зменшенню вуглецевого сліду підприємства.

3. **Економічна мотивація впровадження систем очищення** Для підприємств варто передбачати **податкові пільги** або **екологічні гранти** на модернізацію систем фільтрації. За прикладом країн ЄС, такі стимули можуть компенсувати до **30–40%** вартості обладнання, що значно прискорює окупність проєктів.

4. Перспективи розвитку систем очищення

У найближчі роки деревообробна галузь України має орієнтуватися на **впровадження інтелектуальних систем очищення**, що використовують датчики тиску, температури, вологості та рівня забруднення для автоматичного керування процесом фільтрації. Такі рішення дозволять:

- підвищити ефективність очищення без збільшення енергоспоживання;
- знизити людський фактор у процесі експлуатації;
- забезпечити стабільне дотримання екологічних стандартів ISO 14001.

5. Висновок

Оптимізація систем очищення на деревообробних підприємствах має базуватися на **поєднанні сучасних технологічних рішень, правильної експлуатації обладнання та системного екологічного моніторингу**. Комплексний підхід дозволить не лише зменшити шкідливі викиди, а й досягти значного економічного ефекту, підвищити енергоефективність виробництва та забезпечити відповідність українських деревообробних підприємств європейським екологічним стандартам.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено порівняльний аналіз ефективності різних методів фільтрації, що застосовуються на деревообробних підприємствах, із урахуванням їхніх технічних, екологічних та економічних показників. Дослідження підтвердило, що вибір оптимальної системи очищення є визначальним чинником у зниженні шкідливих викидів пилу й газів, а також у забезпеченні стабільної роботи виробництва.

Типове деревообробне підприємство характеризується значною кількістю джерел забруднення — від утворення деревного пилу при механічній обробці до викидів летких органічних сполук і формальдегіду під час склеювання та сушіння матеріалів. Аналіз показав, що без належних фільтраційних систем рівень запиленості повітря може перевищувати нормативи у 5–10 разів, що створює серйозну екологічну та санітарну загрозу.

Методика оцінки ефективності фільтраційних систем, запропонована у роботі, базується на визначенні коефіцієнта очищення, питомих енергетичних витрат та собівартості експлуатації. Такий підхід дозволив об'єктивно порівняти різні типи фільтрів — тканинні, рукавні та картриджні — і встановити, що:

- **рукавні фільтри** забезпечують найвищий ступінь очищення (до 99,9%) при середньому рівні енергоспоживання;
- **картриджні системи** є найкомпактнішими та придатними для модернізації малих і середніх підприємств;
- **тканинні фільтри** залишаються економічно доцільними для локальних систем, хоча поступаються в довговічності й зручності обслуговування.

У процесі аналізу економічних аспектів доведено, що модернізація фільтраційних систем дозволяє знизити загальні витрати підприємства на обслуговування аспіраційних установок на **15–25%**, а обсяг викидів — на **70–90%**. Екологічний ефект проявляється не лише у зменшенні концентрацій пилу, а й у покращенні якості повітря на виробництві, що сприяє збереженню здоров'я працівників і відповідає сучасним стандартам сталого розвитку.

Запропоновані рекомендації щодо оптимізації систем очищення - зокрема використання комбінованих фільтраційних установок, автоматизованих систем управління, імпульсного очищення фільтрів і рециклінгу пилу — мають потенціал значно підвищити екологічну ефективність деревообробних підприємств України.

Отже, результати розділу засвідчили, що **інтегрований підхід до очищення повітря** на деревообробних підприємствах є не лише технічно виправданим, але й економічно вигідним. Комплексна модернізація фільтраційних систем сприяє формуванню екологічно відповідального виробництва, мінімізації негативного впливу на довкілля та наближенню українських підприємств до вимог Європейського Союзу щодо промислових викидів.

Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

1. Загальні вимоги охорони праці на підприємствах деревообробної промисловості

Виробництво деревинно-стружкових плит (ДСП) належить до результату небезпечних видів діяльності через використання хімічних речовин (зокрема формальдегіду), високу напилуваність повітря, наявність рухомого обладнання, підвищену температуру та шум. Охорона праці на таких підприємствах спрямована на створення безпечних умов праці, попередження виробничого травматизму, професійних захворювань і збереження здоров'я працівників.

Основними документами, які регулюють охорону праці в галузі, є Закон України «Про охорону праці», Державні санітарні правила і нормативи, галузеві стандарти безпеки праці, а також міжнародні та європейські директиви, які впроваджуються у виробничу практику 1 .

2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

У виробництві ДСП основними небезпечними та шкідливими факторами є:

Хімічні фактори: виділення формальдегіду, фенолу, пилу деревини та інших летких органічних сполук під час підготовки сировини, пресування, сушіння та обробки плит.

Фізичні фактори: підвищений рівень шуму (робота дробарок, пресів, вентиляторів), вібрації, висока температура (особливо біля сушарок і пресів), електромагнітне випромінювання.

Механічні фактори: рухомі частини обладнання, ризик пошкодження гострими інструментами, безпека затягування одягу чи волосся в механізмі.

Пожежовибухонебезпечність: наявність легкозаймистих матеріалів (деревна стружка, пил, смоли), висока температура, можливість виникнення іскор.

Таблиця 15 Основні небезпечні та шкідливі фактори і засоби захисту [9-15]

Етап виробництва	Основні фактори	Засоби захисту
Дроблення, сушіння	Пил, шум, температура	Витяжна вентиляція, респіратори, навушники, спецодяг
Клеювання	Формальдегід, хімічні речовини	Локальні витяжки, респіратори, рукавиці, окуляри
Гарячий пресинг	Висока температура, випари	Теплоізоляція, вентиляція, спецодяг
Обрізка, шліфування	Пил, шум	Аспірація, респіратори, навушники
Сортування, складування	Механічні травми, пил	Інструктаж, ЗІЗ, організація робочого простору

3. Організаційні заходи з охорони праці

Для забезпечення безпеки праці на підприємствах впроваджуються такі організаційні заходи:

Проведення інструкторів з охорони праці (вступний, первинний, повторний, позаплановий, цільовий).

Організація навчання та перевірки знань з питань охорони праці для всіх працівників.

Призначення відповідних осіб за стан охорони праці на дільницях.

Розробка та впровадження інструкцій з безпечного виконання робіт на кожному робочому місці.

Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) відповідно до характеру виконаних робіт (респіратори, захисні окуляри, рукавиці, спецодяг, протишумові навушники) 1 .

4. Технічні заходи з охорони праці

Технічні заходи охоплюють:

Автоматизація та механізація виробничих процесів для мінімізації контакту працівників з небезпечними речовинами та механізмами.

Встановлення сучасних систем вентиляції та аспірації для видалення пилу, пари формальдегіду та інших шкідливих речовин із робочої зони.

Застосування герметизації обладнання, особливо на стадіях, де можливо виділення формальдегіду (клеювання, гарячий пресинг).

Впровадження системи локальної витяжної вентиляції у місцях найбільшого виділення шкідливих речовин.

Використання автоматичних систем пожежогасіння, датчиків диму та температури, регулярна перевірка стану протипожежного обладнання.

Обладнання аварійних виходів, евакуаційних шляхів, забезпечення їх вільного доступу 1 .

5. Санітарно-гігієнічні умови праці

Для збереження здоров'я працівників необхідно дотримуватися таких санітарно-гігієнічних вимог:

Контроль концентрації формальдегіду у повітрі робочої зони (гранично допустима концентрація — не більше 0,5 мг/м³ для робочих приміщень).

Регулярний лабораторний контроль повітря на вміст пилу та інших шкідливих речовин.

Організація побутових приміщень (гардеробних, душових, кімнат для відпочинку).

Забезпечення працівників питною водою, безкоштовної гігієни.

Організація раціонального режиму праці та відпочинку, надання додаткових перерв для працівників, які працюють у шкідливих умовах.

Проведення циклу медичних оглядів працівників, які контактують із формальдегідом та іншими шкідливими речовинами.

6. Пожежна безпека

Особливу увагу слід приділяти пожежній безпеці через наявність великої кількості горючих матеріалів:

Зберігання деревної стружки, пилу, клеїв та інших легкозаймистих матеріалів у спеціально відведених місцях.

Регулярне очищення виробничих приміщень від пилу та відходів.

Заборона використання відкритого вогню у виробничих цехах.

Проведення інструкторів з пожежної безпеки, навчання правилам користування первинними засобами пожежогасіння.

Обладнання цехів автоматичними системами пожежогасіння, встановлення пожежної сигналізації, забезпечення пожежних щитів, вогнегасників I .

7. Охорона праці при роботі з формальдегідом

Формальдегід — високотоксична речовина, яка може викликати гострі та хронічні отруєння, подразнення слизових оболонок, додаткові реакції, ризик онкологічних захворювань. Тому при роботі з формальдегідними смолами необхідно:

Використовувати ЗІЗ органів дихання (респіратори з фільтрами для органічних пар), захисний одяг, окуляри.

Забезпечити герметизацію ємностей для зберігання смолу, автоматизувати подачу смолу до змішувачів.

Впровадити локальні витяжки над місцями розливу, змішування, нанесення смол.

Організувати регулярний контроль повітря на вміст формальдегіду, особливо в зонах можливого перевищення ГДК.

Забезпечити надання першої медичної допомоги при отруєнні формальдегідом (наявність аптечка, інструкція з надання допомоги, навчання персоналу).

8. Охорона праці при використанні обладнання

Для попередження травматизму при роботі з обладнанням необхідно:

Використовувати огороження рухомих частин машини, блокування, аварійні вимикачі.

Проводити регулярне технічне обслуговування та ремонт обладнання, не допускати використання несправних машин.

Дотримуватись інструкцій безпечно з використанням, не залишаючи працююче обладнання без нагляду.

Заборонення перебування сторонніх осіб у робочій зоні під час роботи обладнання.

Установити чітку сигналізацію про початок роботи пресів, дробарок, транспортерів.

9. Охорона праці при транспортуванні та складуванні продукції

Організувати безпечні маршрути транспортування сировини, напівфабрикатів та готової продукції.

Використовувати механізовані засоби для переміщення важких вантажів.

Забезпечити стійкість штабелів при складанні плити, слідувати допустимій висоті викладання.

Установити знаки безпеки в місцях підвищеної небезпеки (зони руху навантажувачів, штабелювання).

10. Управління охороною праці на підприємстві

На підприємстві має функціонувати служба охорони праці, яка:

Контроль за дотриманням законодавства з охорони праці.

Проведення атестації робочих місць за умовами праці.

Розслідування нещасних випадків, аналіз причин їх виникнення, розробка профілактичних заходів.

Ведення документації з охорони праці, організації навчання та підвищення кваліфікації працівників у сфері безпеки праці.

11. Висновки до розділу

Охорона праці у виробництві деревинно-структурних плит є комплексною системою заходів, що охоплює організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні, протипожежні та соціальні аспекти. Впровадження сучасних технологій, автоматизація процесів, використання ефективних засобів індивідуального захисту, регулярний контроль за станом виробничого середовища та здоров'ям працівників дозволили мінімізувати ризики для життя і здоров'я персоналу, забезпечити стабільну роботу підприємства та відповідність сучасним екологічним і санітарним стандартам.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської роботи на тему «**Оцінка та порівняльний аналіз використання методів фільтрації для зменшення викидів пилу та газів на деревообробних підприємствах**» було здійснено всебічне дослідження сучасних технологій очищення повітря, їхньої ефективності, економічної доцільності та екологічного впливу.

Деревообробна промисловість належить до галузей із підвищеним рівнем утворення пилу й газоподібних забруднень. Основними джерелами цих викидів є процеси розпилювання, шліфування, сушіння, склеювання та лакування деревини. За відсутності ефективних систем очищення, у повітря потрапляють значні обсяги деревного пилу, летких органічних сполук (ЛОС) та формальдегіду, що негативно впливають на стан довкілля, мікроклімат виробничих приміщень і здоров'я працівників.

У першому розділі було розкрито теоретичні основи формування газопилових викидів у деревообробній промисловості та розглянуто основні методи їхнього очищення: **фільтрацію, адсорбцію, абсорбцію, електрофільтрацію**. Визначено, що саме фільтраційні методи є найбільш ефективними та технологічно доцільними для затримання деревного пилу дрібнодисперсної фракції (до 10 мкм), а також здатні забезпечити ступінь очищення понад **99%**.

Другий розділ присвячено детальному аналізу конструкцій і принципів дії різних типів фільтрів — **тканинних, рукавних і картриджних**. Доведено, що:

- тканинні фільтри є простими у виготовленні та дешевими, але мають нижчу довговічність;
- рукавні фільтри забезпечують найвищий ступінь очищення та стабільну роботу в умовах високої запиленості;

- картриджні фільтри мають компактну конструкцію, економлять енергію та зручні для модернізації діючих систем. Проведено порівняльну оцінку за технічними й експлуатаційними критеріями, що дозволило визначити оптимальні сфери застосування кожного типу системи.

У третьому розділі було розроблено **методику оцінки ефективності фільтраційних систем**, проведено аналіз практичних прикладів їхнього використання на деревообробних підприємствах, а також здійснено розрахунки економічної доцільності впровадження сучасних систем очищення. Результати показали, що модернізація систем фільтрації дозволяє зменшити обсяг шкідливих викидів на **70–90%**, а витрати на обслуговування — на **15–25%**.

Запропоновані у роботі **рекомендації щодо оптимізації систем очищення** включають:

- впровадження комбінованих фільтраційних систем (циклон + рукавний або картриджний фільтр);
- автоматизацію процесів очищення фільтрувальних елементів;
- використання енергоефективних вентиляторів і частотного регулювання потоку повітря;
- впровадження систем моніторингу концентрацій пилу й газів у реальному часі;
- рециклінг зібраного пилу як вторинної сировини для виготовлення пелет або плитних матеріалів.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що **раціональний вибір і впровадження сучасних фільтраційних систем** на деревообробних підприємствах забезпечують:

- досягнення стабільно високої якості очищення повітря (до 99,9%);

- зниження концентрації шкідливих викидів у робочій зоні до нормативних значень;
- покращення умов праці персоналу;
- зменшення екологічного навантаження на довкілля;
- скорочення експлуатаційних витрат підприємства.

Підсумовуючи, можна зазначити, що впровадження ефективних фільтраційних технологій є **ключовим елементом екологічної модернізації деревообробної промисловості України**. Це сприяє переходу галузі до принципів сталого розвитку, екологічної безпеки виробництва та гармонізації з вимогами екологічного законодавства Європейського Союзу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Бондаренко В. М.** Технології очищення промислових газів: навч. посіб. — Київ: Либідь, 2020. — 312 с.
2. **Кириленко О. І.** Екологічна безпека в деревообробній промисловості. — Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2019. — 185 с.
3. **Мельник Л. Г., Руденко В. П.** Основи екології. — Суми: Університетська книга, 2018. — 528 с.
4. **Мартинюк І. В.** Очищення повітряних викидів деревообробних підприємств. — Київ: НТУ, 2021. — 146 с.
5. **ДСТУ 4275:2003.** Охорона повітря. Загальні вимоги до очищення газів від пилу. — Київ: Держспоживстандарт України, 2003.
6. **ДСТУ ISO 14001:2015.** Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. — Київ: Мінекономрозвитку України, 2016.
7. **Савчук В. І.** Екологічні аспекти діяльності деревообробних підприємств. — Івано-Франківськ: Лісівнича академія наук України, 2020. — 204 с.
8. **Горбачов В. І.** Промислова екологія: підручник. — Харків: ХНУРЕ, 2021. — 368 с.
9. **Пелешко І. Д., Пелешко Д. І.** Фільтраційні системи для очищення промислових викидів: сучасний стан і перспективи розвитку. // Наукові праці Лісотехнічного університету України. — 2020. — №30(2). — С. 122–129.
10. **Панчук О. В.** Методи зменшення пилових викидів на деревообробних підприємствах. // Екологічна безпека і природокористування. — 2019. — №3. — С. 48–55.
11. **Постанова Кабінету Міністрів України №302 від 13.03.2002 р.** «Про затвердження Порядку проведення моніторингу викидів забруднюючих речовин у повітря»
12. **Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України №44 від 27.01.2021 р.** «Про затвердження Методики визначення обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря».
13. **Гриценко С. П.** Системи очищення промислових газів і вентиляції. — Київ: Арістей, 2017. — 295 с.
14. **Білецький В. С.** Технології захисту атмосферного повітря від промислових забруднень. — Донецьк: ДонНТУ, 2016. — 256 с.

15. **Жовтанецький В. А.** Екологічна оцінка та управління якістю повітря. — Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2022. — 223 с.
16. **Тимошук І. І.** Вплив формальдегіду на екосистеми у зоні діяльності деревообробних підприємств. // Вісник екології. — 2021. — №4. — С. 97–104.
17. **Розенфельд Л. І.** Методи контролю концентрацій шкідливих речовин у повітрі. — Київ: Освіта, 2020. — 210 с.
18. **Ковальчук П. М.** Сучасні методи очищення промислових викидів від газів і пилу. — Чернівці: Рута, 2018. — 190 с.
19. **Стороженко О. В.** Екологічні аспекти застосування рукавних фільтрів у деревообробній промисловості. // Екологічний журнал. — 2022. — №2. — С. 61–68.
20. **Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України.** Офіційний сайт: <https://mepg.gov.ua> (дата звернення: 10.10.2025).
21. **European Environment Agency (EEA).** Air quality in Europe — 2023 Report. — Copenhagen: EEA, 2023. — 108 p.
22. **Schlosser, O., et al.** Air pollution control in wood processing industries. // *Journal of Cleaner Production*. — 2021. — Vol. 278. — P. 124–137.
23. **Directive 2010/75/EU** of the European Parliament and of the Council on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). — Brussels: EU Publications, 2010.
24. **World Health Organization (WHO).** Air quality guidelines for Europe. — Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2022. — 287 p.
25. **EPA (Environmental Protection Agency, USA).** Best Available Control Technologies for Wood Products Manufacturing. — Washington, D.C.: EPA Office of Air Quality Planning, 2021. — 76 p.