

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР. АТм-001.00.00.000 ПЗ

Група АТм-24-1

Василь ВЕРПУК

2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інженерної механіки і робототехніки
Кафедра Автомобільного транспорту

Вепрук Василь Іванович

УДК 629

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Удосконалення система очищення та рециркуляції повітря в
малярні камері.

Автомобільний транспорт

274 – Автомобільний транспорт

Студент _____ Вепрук Василь Іванович

Науковий керівник _____ Микитій Іван Михайлович, д.ф.

Допущено до захисту

завідувач кафедри автомобільного транспорту

д.т.н, професор. _____ С.І. Криштопа

Рецензент

д.ф., доцент

_____ М.М. Гнип

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут: інженерної механіки і робототехніки

Кафедра: автомобільного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр Спеціальність:

274 “Автомобільний транспорт”

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри АТ

проф. _____ Святослав КРИШТОПА

“ ____ ” _____
_____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту

Вепруку Василю Івановичу

1 Тема роботи: Удосконалення система очищення та рециркуляції повітря в малярні камері.

керівник проекту (роботи) Микитій І. М., д.ф.

Затверджена наказом ректора університету від “№ 738 / 7 від 28. 11.2025 ”

2 Термін здачі студентом закінченої роботи до 20.12.2025 р.

3 Вихідні дані до роботи 1. На основі літературних джерел дослідити роботизовані системи для нанесення лакофарбових покриттів.

Зміст розрахунково пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) 1. . Огляд літератури та сучасних технологій. 2. Теоретичні основи процесу очищення та рециркуляції: 2.1 Фізико-хімічні властивості фарбувальних аерозолів. 2.2. Дослідження електростатичне розпилення. 3. Аналіз існуючої системи малярної камери: 3.1 Конструктивні особливості камери. 3.2 Типи фільтрів та їх ефективність. 4 Розробка удосконаленої системи: 4.1 Пропозиції щодо модернізації системи очищення. 4.2 Оптимізація рециркуляційних потоків. 5. Моделювання та експериментальні дослідження. 5.1 Розробка математичної моделі процесу очищення. 6. Економічна та екологічна оцінка: 6.1 Розрахунок енергоспоживання та витрат на експлуатацію. 6.2 Економічна ефективність модернізації.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) презентація.

6. Консультанти з проєкту (роботи), із зазначенням розділів проєкту

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	доц. Прунько І.Б.		

7. Дата видачі завдання “ ” 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор №	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури та сучасних технологій	26.10.2025	Виконано
2	Теоретичні основи процесу очищення та рециркуляції	29.10.2025	Виконано
3	Аналіз існуючої системи малярної камери	30.10.2025	Виконано
4	Розробка удосконаленої системи	06.12.2025	Виконано
5	Моделювання та експериментальні дослідження	10.12.2025	Виконано
6	Економічна та екологічна оцінка	13.12.2025	Виконано
7	Висновки	15.12.2025	Виконано

Студент

Василь Верпук
(підпис) (розшифрування підпису)

Керівник роботи

Іван МИКИТІЙ
(підпис) (розшифрування підпису)

АНОТАЦІЯ

Верпук В.І.

Тема роботи: Удосконалення система очищення та рециркуляції повітря в малярні камері.

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт».

Заклад освіти Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу.

Івано-Франківськ, 2025 рік.

Робота містить 62 сторінок, 8 таблиць, 17 рисунків, список літератури з 16 найменувань.

Магістерська робота присвячена дослідженню та удосконаленню системи очищення та рециркуляції повітря в малярні камері. Ефективність роботи визначається конструкцією, якістю очищення повітря та організацією вентиляції.

Математична модель дозволила оптимізувати конструкцію, вибір фільтрів і режими вентиляції, забезпечуючи екологічну безпеку.

Експериментальні вимірювання показали зниження концентрації фарбового туману та ЛОС.

CFD-моделювання підтвердило ламінарний потік і рівномірне обтікання автомобіля.

Екологічна оцінка підтвердила відповідність сучасним нормативам і зменшення впливу на довкілля.

Ключові слова: Фільтрація, фарбування, системи очищення, математична модель, , система рекуперації, якість фільтпвції.

ABSTRACT

Verpuk V.I.

Thesis title: Improvement of the Air Purification and Recirculation System in a Spray Booth.

Specialty: 274 "Automotive Transport".

Institution: Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Location: Ivano-Frankivsk, 2025.

The thesis consists of 62 pages, 8 tables, 17 figures, and a reference list of 16 sources.

This master's thesis is devoted to the study and improvement of the air purification and recirculation system in a spray booth. The efficiency of operation is determined by the design features, the quality of air purification, and the organization of ventilation.

A mathematical model was developed to optimize the booth design, the selection of filtering elements, and ventilation modes, ensuring environmental safety.

Experimental measurements demonstrated a reduction in the concentration of paint mist (PM_{2.5}/PM₁₀) and volatile organic compounds (VOC). CFD simulations confirmed the laminar airflow and uniform distribution around the vehicle, ensuring effective particle removal through the underfloor exhaust system.

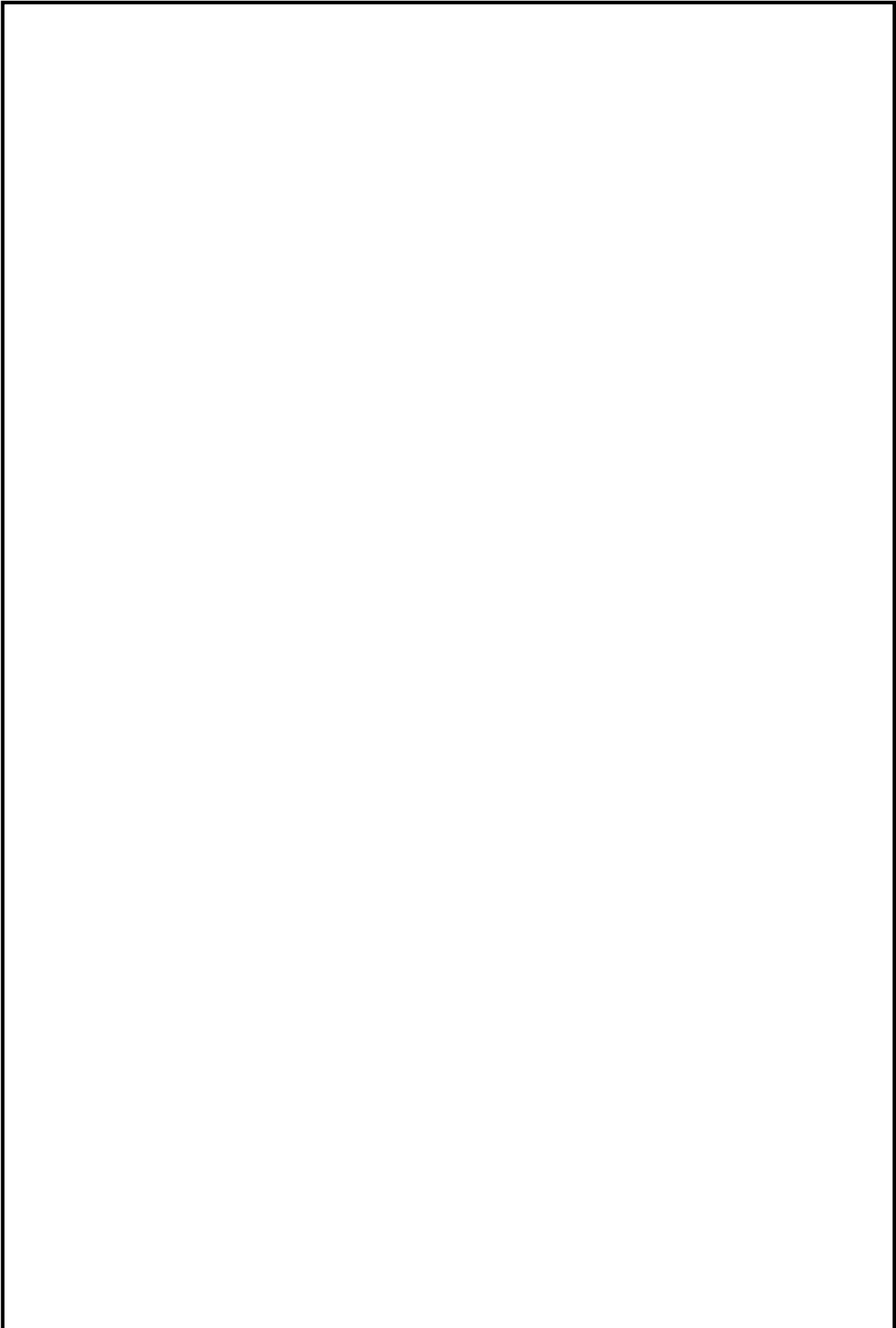
The environmental assessment verified compliance with modern standards and a reduction in negative environmental impact.

Keywords: Filtration, painting, purification systems, mathematical model, recirculation system, filtration quality.

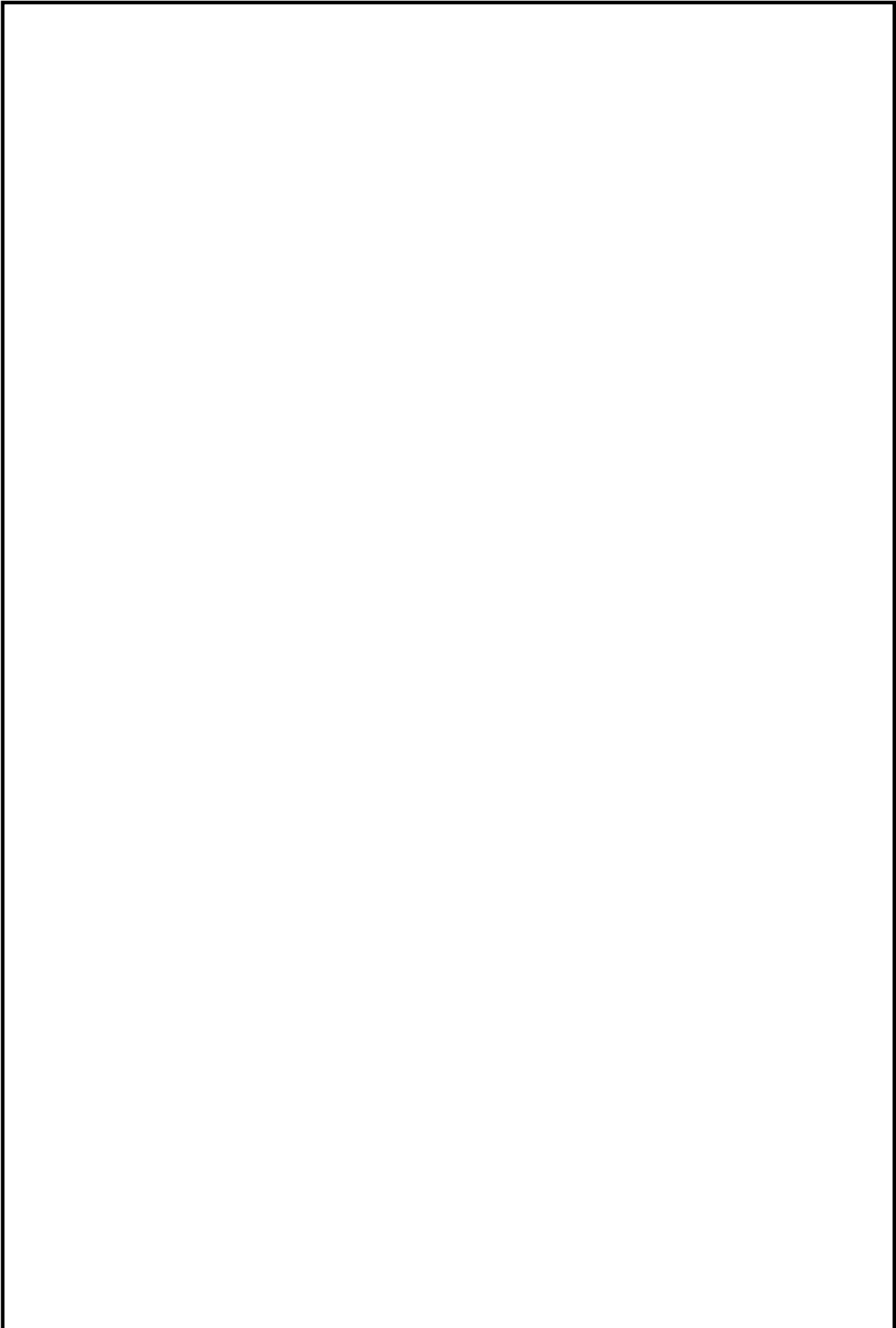
ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Огляд літератури та сучасних технологій	9
2 Теоретичні основи процесу очищення та рециркуляції.....	13
3 Аналіз існуючої системи малярної камери.....	25
4 Розробка удосконаленої системи.....	37
5 Моделювання та експериментальні дослідження.....	41
6 Економічна та екологічна оцінка.....	54
Висновки.....	58
Перелік посилань на джерела.....	60
ДОДАТОК А	61
ДОДАТОК Б	62
ДОДАТОК В Презентація.....	63

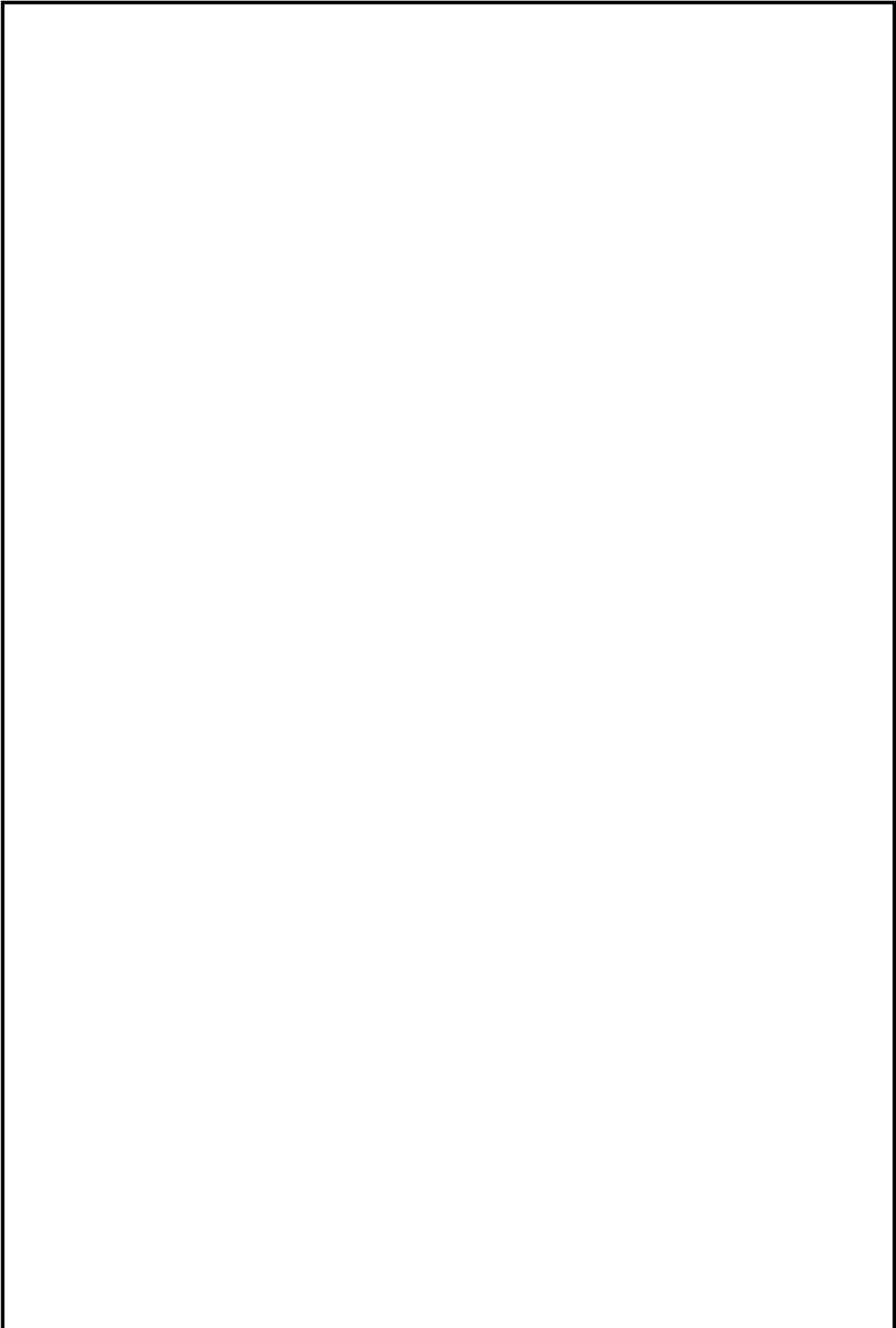
					MP.AГм-01.00.00.000 ПЗ			
Змін.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Верпук В.І.			Удосконалення система очищення та рециркуляції повітря в малярні камері.	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Микитій ІюМю					6	63
Реценз.						ІФНТУНГ, АГз-06-1		
Н. контр.		Прунько І.Б.						
Затверд.		Криштопа С.І						



					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Актуальність дослідження.

Сучасні малярні камери широко застосовуються у промисловості для нанесення лакофарбових покриттів на автомобілі, металеві конструкції та інші вироби. У процесі фарбування утворюється значна кількість аерозольних частинок, летких органічних сполук та пилу, які становлять небезпеку для здоров'я працівників і довкілля. Традиційні системи вентиляції та очищення повітря часто не забезпечують належного рівня фільтрації, що призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин, нерівномірного розподілу потоків повітря та підвищеного енергоспоживання. Таким чином, удосконалення системи очищення та рециркуляції повітря є актуальним завданням, спрямованим на підвищення ефективності виробництва, забезпечення екологічної безпеки та покращення умов праці.

Вплив якості вентиляції на безпеку, екологію та технологічний процес. Якість вентиляції безпосередньо визначає рівень безпеки персоналу. Недостатня очистка повітря може спричинити професійні захворювання, алергічні реакції та зниження працездатності. З екологічної точки зору, неефективні системи фільтрації сприяють викидам токсичних речовин у навколишнє середовище, що суперечить сучасним стандартам охорони праці та екологічним нормам. Крім того, стабільність і рівномірність повітряних потоків у камері впливають на якість нанесення фарби: нерівномірний розподіл може викликати дефекти покриття, осідання пилу на поверхні та збільшення витрат матеріалів. Отже, удосконалення системи вентиляції та рециркуляції є критично важливим для досягнення високих стандартів безпеки, екології та технологічної якості.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мета та завдання дослідження

Мета роботи полягає у розробці та обґрунтуванні удосконаленої системи очищення та рециркуляції повітря в малярній камері, яка забезпечить зниження концентрації шкідливих речовин, оптимізацію енергоспоживання та покращення якості фарбування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- здійснити аналіз існуючих систем очищення та рециркуляції повітря;
- визначити їхні недоліки та проблемні аспекти;
- розробити концепцію удосконаленої системи з використанням сучасних технологій фільтрації та автоматизації;
- провести моделювання потоків повітря та оцінити ефективність запропонованих рішень;
- виконати експериментальні дослідження та порівняти результати роботи нової системи з традиційними аналогами;
- оцінити економічну та екологічну ефективність впровадження удосконаленої системи.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження – процес очищення та рециркуляції повітря в малярних камерах промислового призначення.

Предмет дослідження – технічні та технологічні рішення, що забезпечують удосконалення системи очищення та рециркуляції повітря, включаючи конструктивні особливості фільтрів, схеми вентиляції, методи контролю та оптимізації потоків.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1. Аналіз існуючих систем очищення повітря в малярних камерах

У промислових малярних камерах застосовуються багатоступеневі системи очищення повітря, які забезпечують відповідність санітарним нормам та технологічним вимогам фарбувальних процесів. Такі системи зазвичай складаються з трьох основних етапів:

- Попереднє очищення (грубі фільтри): Використовуються для затримання великих частинок пилу та фарбувальних аерозолів. Найчастіше це панельні або касетні фільтри з синтетичних матеріалів чи скловолокна.
- Фільтри тонкого очищення: Призначені для вилучення дрібніших частинок, що утворюються під час розпилення лакофарбових матеріалів. У конструкції застосовуються багатошарові волокнисті матеріали, які забезпечують поступове зниження концентрації аерозолів.
- Кінцеві фільтри високої ефективності (HEPA/ULPA): Використовуються для досягнення максимальної чистоти повітря, особливо у випадках, коли технологічний процес вимагає мінімальної кількості залишкових частинок.

Конструктивні рішення

У літературі описано кілька підходів до організації систем очищення:

- Механічні фільтри: прості у використанні, але мають обмежену ефективність щодо дрібнодисперсних частинок.
- Комбіновані системи: поєднують механічні фільтри з адсорбційними матеріалами (активоване вугілля) для вилучення летких органічних сполук (ЛОС).
- Електростатичні осаджувачі: дозволяють ефективно осаджувати дрібні аерозольні частинки, проте потребують значних енергетичних витрат та регулярного технічного обслуговування.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні проблеми існуючих систем

- Високе енергоспоживання, пов'язане з необхідністю підтримання стабільного повітрообміну та роботи вентиляторів.
- Обмежена ефективність при роботі з дрібнодисперсними частинками (<1 мкм), які становлять найбільшу небезпеку для здоров'я працівників.
- Високі експлуатаційні витрати, що включають регулярну заміну фільтрів та утилізацію відпрацьованих матеріалів.
- Недостатня адаптивність до змінних умов роботи (інтенсивність фарбування, типи лакофарбових матеріалів, сезонні коливання температури та вологості).

Попри значну кількість досліджень та наявність різноманітних конструктивних рішень, сучасні системи очищення повітря в малярних камерах потребують вдосконалення. Основні напрями розвитку включають:

- зниження енергоспоживання за рахунок оптимізації аеродинаміки та використання енергоефективних вентиляторів;
- впровадження нових фільтрувальних матеріалів з високою селективністю до дрібнодисперсних частинок;
- комбінування механічних та фізико-хімічних методів очищення;
- автоматизацію систем контролю якості повітря та адаптивне регулювання режимів роботи.

1.2. Методи рециркуляції та їх ефективність

Рециркуляція повітря в малярних камерах дозволяє зменшити витрати енергії та забезпечити стабільність мікроклімату. Найпоширенішими методами є:

- часткова рециркуляція – коли частина очищеного повітря повертається у камеру, а решта виводиться назовні;
- повна рециркуляція – коли весь об'єм повітря після очищення знову використовується у процесі;

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

- динамічна рециркуляція – із застосуванням датчиків для автоматичного регулювання потоків залежно від концентрації забруднень.

Ефективність рециркуляції залежить від якості фільтрації та рівномірності розподілу потоків. Дослідження показують, що оптимальне поєднання багатоступеневої очистки та автоматизованого контролю дозволяє знизити витрати енергії до 30–40 % без погіршення якості фарбування.

1.3. Вимоги міжнародних стандартів (ISO, OSHA, ДСТУ)

Міжнародні стандарти встановлюють жорсткі вимоги до систем очищення та рециркуляції повітря:

- ISO 14644 – регламентує класи чистоти повітря у виробничих приміщеннях, включаючи фарбувальні камери;
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration, США) – визначає гранично допустимі концентрації летких органічних сполук та пилу, а також вимоги до вентиляції;
- ДСТУ EN 16985:2019 – український стандарт, що регламентує безпеку та екологічні вимоги до фарбувальних камер.

Дотримання цих норм є обов’язковим для підприємств, що прагнуть відповідати міжнародним критеріям якості та безпеки.

1.4. Недоліки традиційних систем та потреба в удосконаленні

Попри широке застосування, традиційні системи очищення та рециркуляції мають низку недоліків:

- високе енергоспоживання через постійне оновлення повітря;
- недостатня ефективність при видаленні дрібнодисперсних частинок та ЛОС;
- нерівномірний розподіл потоків, що призводить до дефектів фарбування;
- складність обслуговування та висока вартість заміни фільтрів.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Ці проблеми зумовлюють необхідність розробки нових рішень, які поєднують багатоступеневу фільтрацію, автоматизований контроль параметрів повітря та енергоефективні технології.

Таким чином, огляд літератури підтверджує, що існуючі системи очищення та рециркуляції повітря потребують модернізації. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення комплексних рішень, які забезпечать одночасно високу якість фарбування, безпеку працівників та відповідність екологічним стандартам.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ТА РЕЦИРКУЛЯЦІЇ

2.1. Фізико-хімічні властивості фарбувальних аерозолів

У процесі розпилення лакофарбових матеріалів утворюються аерозолі, що складаються з дрібнодисперсних частинок фарби та летких органічних сполук (ЛОС). Їхні властивості визначаються:

- розміром частинок (від 0,1 до 50 мкм), що впливає на швидкість осадження та можливість проникнення у дихальні шляхи;
- хімічним складом – наявністю розчинників, пігментів, смол, які можуть бути токсичними та вибухонебезпечними;
- електростатичними характеристиками – заряджені частинки взаємодіють із поверхнями та фільтраційними матеріалами, що впливає на ефективність їх уловлювання.

Ці властивості визначають необхідність застосування багатоступневих систем очищення, здатних ефективно видаляти як тверді частинки, так і газоподібні забруднювачі.

2.2. Механізми осадження та фільтрації частинок

Основними механізмами видалення фарбувальних аерозолів є:

- гравітаційне осадження – великі частинки осідають під дією сили тяжіння;
- інерційне осадження – частинки змінюють траєкторію при зіткненні з перешкодами у потоці;
- дифузійна фільтрація – дрібні частинки (<1 мкм) рухаються хаотично та осідають на волокнах фільтра;
- електростатичне осадження – заряджені частинки притягуються до електродів або спеціальних фільтраційних матеріалів;
- адсорбція газів і парів – леткі органічні сполуки поглинаються активованим вугіллям чи каталізаторами.

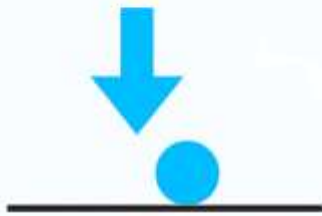
Комбінація цих механізмів забезпечує максимальну ефективність очищення, особливо у багатоступневих системах.

					МР.АТм-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Механізми осадження та фільтрації частинок

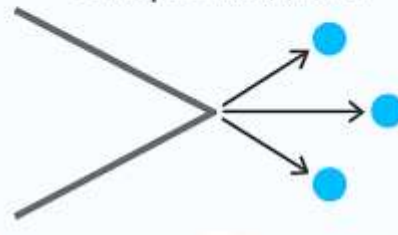
Гравітаційне осадження

Великі частинки осідають під дією сили тяжіння



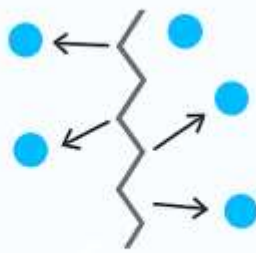
Інерційне осадження

Частинки змінюють траєкторію пригткенні з перешкодами



Дифузійна фільтрація

Дрібні частинки осідають на волокнах фільтра



Електростатичне осадження

Заряджені частинки притягуються до електродів

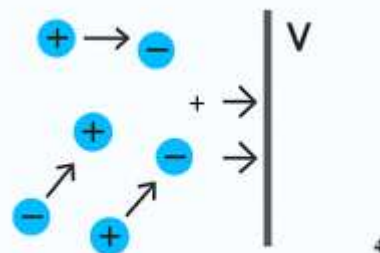


Рисунок 1. Схема-діаграма механізмів осадження та фільтрації частинок у малярній камері. У ній відображено: 1 гравітаційне осадження, 2 інерційне осадження, 3 дифузійна фільтрація, 4 електростатичне осадження, адсорбція газів і парів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Гравітаційне осадження – це процес, при якому великі частинки аерозолію осідають під дією сили тяжіння. Він є одним із найпростіших і найдавніших механізмів очищення повітря.

Фізична суть:

- Частинки з діаметром понад 10–20 мкм мають достатню масу, щоб подолати турбулентні потоки й поступово осідати вниз.
- Швидкість осадження визначається законом Стокса:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2(\rho_p - \rho_f)g}{\mu}$$

де r – радіус частинки, ρ_p – густина частинки, ρ_f – густина повітря, g – прискорення вільного падіння, μ – динамічна в'язкість повітря.

Практичне застосування:

- Використовується у відстійниках та камерах попереднього очищення.
- Ефективний для видалення великих крапель фарби та пилу.
- Недостатньо ефективний для дрібнодисперсних частинок (<5 мкм), які залишаються у повітрі.

Переваги:

- Простота реалізації.
- Низькі енергетичні витрати.
- Можливість комбінування з іншими методами (фільтрація, електростатичне осадження).

Недоліки:

- Обмежена ефективність для дрібних частинок.
- Потреба у великих об'ємах камер для забезпечення достатнього часу осадження

					МР.АТм-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Інерційне осадження

Інерційне осадження – це процес, при якому частинки аерозолію відхиляються від основного потоку повітря та осідають на поверхнях або фільтрах через свою масу та інерцію.

Фізична суть:

- Частинки, що рухаються разом із потоком повітря, мають певну масу та інерцію.
- Коли потік змінює напрямок (наприклад, при зустрічі з перешкодою чи різкою зміною траєкторії), дрібні частинки слідуєть за потоком, а більші – продовжують рухатися прямолінійно й осідають на поверхні.
- Ефективність інерційного осадження залежить від розміру та густини частинок, швидкості потоку та геометрії каналу.

Практичне застосування:

- Використовується у циклонах, скруберах та спеціальних фільтрах, де створюються умови для різкої зміни напрямку потоку.
- Ефективний для частинок середнього розміру (5–20 мкм), які не осідають гравітаційно, але мають достатню масу для інерційного відхилення.

Переваги:

- Простота конструкції та експлуатації.
- Висока ефективність для середньодисперсних частинок.
- Можливість комбінування з іншими методами очищення.

Недоліки:

- Низька ефективність для дуже дрібних частинок (<1 мкм), які слідуєть за потоком.
- Потреба у створенні спеціальних умов (перешкоди, вигини, зміни напрямку потоку).

Приклад у малярній камері: Коли повітряний потік із фарбувальними аерозолями проходить через змінений канал або зустрічає решітку, більші

					MP.ATm-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

частинки фарби не встигають змінити напрямок разом із потоком і осідають на поверхні решітки чи фільтра.

2.3. Дифузійна фільтрація

Дифузійна фільтрація – це процес уловлювання дрібнодисперсних частинок (менше 1 мкм), які рухаються хаотично завдяки броунівському руху та осідають на волокнах фільтрувального матеріалу.

Фізична суть:

- Частинки малого розміру мають настільки малу масу, що їхній рух визначається випадковими зіткненнями з молекулами газу.
- Внаслідок цього вони відхиляються від основної траєкторії потоку та стикаються з волокнами фільтра.
- Ефективність дифузійної фільтрації зростає зі зменшенням розміру частинок і зі збільшенням щільності та товщини фільтрувального матеріалу.

Практичне застосування:

- Використовується у високоефективних фільтрах (HEPA, ULPA), які здатні затримувати до 99,97 % частинок розміром 0,3 мкм.
- Особливо важлива у фарбувальних камерах для видалення найдрібніших аерозолів, що не осідають гравітаційно чи інерційно.

Переваги:

- Висока ефективність для дрібних частинок.
- Забезпечує чистоту повітря відповідно до міжнародних стандартів ISO.
- Може комбінуватися з іншими механізмами (гравітаційним, інерційним, електростатичним).

Недоліки:

- Високий опір потоку повітря через щільність фільтра.
- Потреба у регулярній заміні фільтрувальних елементів.
- Зростання енергоспоживання системи вентиляції.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Приклад у малярній камері: Дрібні частинки фарбувального аерозолі, що утворюються при розпиленні, хаотично рухаються та осідають на волокнах фільтра тонкого очищення, забезпечуючи чистоту повітря у робочій зоні.

2.4. Електростатичне осадження

Електростатичне осадження – це процес уловлювання частинок аерозолі за допомогою електричного поля. Заряджені частинки притягуються до електродів або спеціальних поверхонь, що мають протилежний заряд, і осідають на них.

Фізична суть:

- Частинки фарбувального аерозолі під час розпилення можуть набувати електричного заряду.
- У зоні дії електростатичного поля вони змінюють траєкторію руху та притягуються до електродів.
- Ефективність залежить від сили електричного поля, розміру частинок та їхнього заряду.
- Використовується принцип кулонівської взаємодії:

$$F = q \cdot E$$

де F – сила притягання, q – заряд частинки, E – напруженість електричного поля.

Практичне застосування:

- Електростатичні фільтри (ESP – Electrostatic Precipitators) у системах очищення повітря.
- Малярні камери з електростатичним розпиленням фарби: заряджені частинки фарби рівномірно осідають на поверхні виробу, що підвищує якість покриття та зменшує витрати матеріалів.
- Використовується для уловлювання дрібнодисперсних частинок, які важко видалити гравітаційним чи інерційним способом.

Переваги:

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

- Висока ефективність для частинок розміром <1 мкм.
- Зменшення витрат фарби завдяки більш рівномірному нанесенню.
- Можливість роботи з великими об'ємами повітря.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання.
- Необхідність регулярного очищення електродів.
- Залежність від стабільності електричного поля та вологості повітря.

Приклад у малярній камері: При електростатичному фарбуванні заряджені частинки фарби притягуються до заземленої поверхні виробу. Це забезпечує рівномірне покриття, зменшує утворення туману та підвищує ефективність очищення повітря у камері.

2.5. Адсорбція газів і парів

Адсорбція газів і парів – це процес поглинання молекул летких органічних сполук (ЛОС) та інших газоподібних забруднювачів поверхнею твердого сорбенту (найчастіше активованого вугілля, цеоліту або спеціальних каталізаторів).

Фізична суть:

- Молекули газів і парів взаємодіють із поверхнею сорбенту завдяки фізичним (ван-дер-ваальсові сили) або хімічним (каталітичні реакції) механізмам.
- Ефективність адсорбції залежить від:
 - площі поверхні сорбенту (чим більша, тим більше молекул може бути поглинуто);
 - температури (при високій температурі адсорбція знижується);
 - концентрації забруднювачів у повітрі;
 - вологості (надмірна вологість може зменшувати ефективність).

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Адсорбція газів і парів

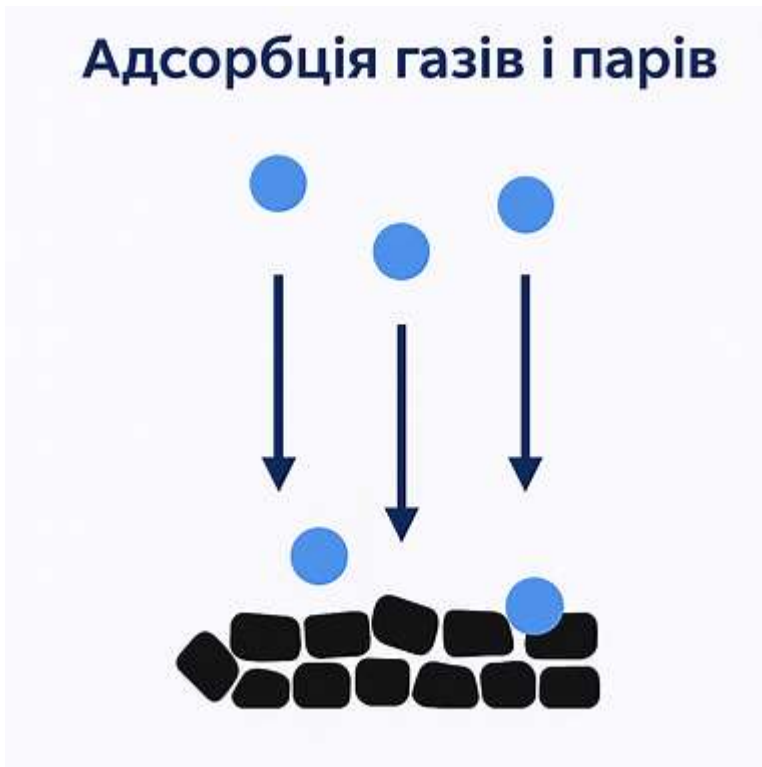


Рисунок 2. Схематичний рисунок процесу адсорбції газів і парів.
На малюнку показано, як молекули газу (сині кружечки) рухаються в потоці повітря та осідають на поверхні чорних гранул активованого вугілля.

Практичне застосування:

- Використання активованого вугілля для уловлювання органічних розчинників у малярних камерах.
- Застосування каталітичних фільтрів для окиснення ЛОС до менш шкідливих речовин (наприклад, CO_2 та H_2O).
- Використання цеолітових матеріалів для селективного поглинання певних газів.

Переваги:

- Висока ефективність для газоподібних забруднювачів, які не можна видалити механічними методами.
- Можливість регенерації сорбентів (наприклад, термічне відновлення активованого вугілля).
- Відповідність міжнародним екологічним стандартам.

Недоліки:

					МР.АТм-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- Обмежений ресурс сорбентів (потреба у регулярній заміні або регенерації).
- Висока вартість каталізаторів.
- Залежність ефективності від умов експлуатації (температура, вологість).

Приклад у малярній камері: Пари органічних розчинників, що утворюються під час фарбування, проходять крізь шар активованого вугілля, де вони адсорбуються на його поверхні. Це дозволяє знизити концентрацію токсичних речовин у робочій зоні та мінімізувати їхні викиди у довкілля.

Таблиця 1. Терміни та пояснення основних механізмів осадження та фільтрації частинок.

№	Термін	Пояснення
1	Гравітаційне осадження	Великі частинки осідають під дією сили тяжіння.
2	Інерційне осадження	Частинки відхиляються від потоку повітря та зіштовхуються з перешкодами.
3	Дифузійна фільтрація	Дрібні частинки рухаються хаотично та осідають на волокнах фільтра.
4	Електростатичне осадження	Заряджені частинки притягуються до електродів або заряджених поверхонь.
5	Адсорбція газів і парів	Газоподібні забруднювачі поглинаються активованим вугіллям або каталізаторними поверхнями.
6	Механічна фільтрація	Частинки фізично затримуються пористим фільтрувальним матеріалом.
7	Комбінована система фільтрації	Поєднання кількох механізмів для підвищення ефективності очищення повітря.
8	Рециркуляція повітря	Повторне використання очищеного повітря для зменшення енергоспоживання та стабілізації умов.
9	Вентиляційна система	Система для забезпечення повітрообміну та регулювання потоків у закритих

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.6. Вплив швидкості повітряного потоку на якість фарбування

Швидкість руху повітря у малярній камері є критичним параметром, що впливає на:

- якість нанесення покриття – надто низька швидкість призводить до осідання пилу та нерівномірного розподілу фарби;
- ефективність видалення аерозолів – надто висока швидкість може спричинити турбулентність, що погіршує якість фарбування та збільшує витрати матеріалів;
- комфорт працівників – оптимальна швидкість (0,3–0,5 м/с у робочій зоні) забезпечує безпечні умови праці та стабільність технологічного процесу.

Таким чином, контроль швидкості повітряного потоку є необхідною умовою для досягнення високої якості фарбування та ефективної роботи системи очищення.

2.7. Енергетичні аспекти рециркуляції

Рециркуляція повітря дозволяє значно знизити енергоспоживання системи вентиляції. Основні аспекти:

- зменшення витрат на підігрів та охолодження – повторне використання очищеного повітря знижує потребу у кондиціонуванні;
- рекуперація тепла – застосування теплообмінників дозволяє використовувати енергію відпрацьованого повітря для підігріву свіжого;
- автоматичне регулювання потоків – сучасні системи з датчиками концентрації забруднень оптимізують роботу вентиляторів, зменшуючи споживання електроенергії;
- баланс між економією та безпекою – надмірна рециркуляція без належної очистки може призвести до накопичення токсичних речовин, тому необхідне поєднання енергоефективності та екологічних вимог.

					МР.АТм-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Енергетичний аналіз підтверджує, що удосконалені системи рециркуляції здатні зменшити витрати на експлуатацію малярних камер на 25–40 %, одночасно забезпечуючи відповідність міжнародним стандартам.

Висновок до розділу

У результаті проведеного теоретичного аналізу встановлено, що процес очищення та рециркуляції повітря в малярних камерах є багатofакторним і визначається фізико-хімічними властивостями фарбувальних аерозолів, механізмами їх осадження та фільтрації, параметрами повітряного потоку та енергетичними характеристиками системи.

Фізико-хімічні властивості фарбувальних аерозолів зумовлюють складність їх видалення з повітряного середовища. Дрібнодисперсні частинки та леткі органічні сполуки потребують застосування багатоступеневих систем очищення, що поєднують механічні, електростатичні та адсорбційні методи.

Механізми осадження та фільтрації частинок (гравітаційне, інерційне, дифузійне, електростатичне та адсорбційне) мають різну ефективність залежно від розміру та складу частинок. Їх комбіноване використання забезпечує найбільш повне очищення повітря.

Вплив швидкості повітряного потоку є критичним для якості фарбування: надто низька швидкість спричиняє осідання пилу та нерівномірність покриття, тоді як надто висока – створює турбулентність і дефекти поверхні. Оптимальний контроль швидкості забезпечує баланс між якістю фарбування та ефективністю очищення.

Енергетичні аспекти рециркуляції підтверджують, що повторне використання очищеного повітря дозволяє знизити витрати на експлуатацію системи на 25–40 %. Водночас надмірна рециркуляція без належної очистки може призвести до накопичення токсичних речовин, що вимагає поєднання енергоефективності з екологічними вимогами.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таким чином, теоретичні основи процесу очищення та рециркуляції свідчать про необхідність комплексного підходу, який враховує фізико-хімічні характеристики аерозолів, оптимальне поєднання механізмів фільтрації, регулювання швидкості повітряних потоків та енергоефективність системи. Це створює підґрунтя для розробки удосконалених технологічних рішень, здатних забезпечити високу якість фарбування, безпеку працівників та відповідність екологічним стандартам.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

3. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ МАЛЯРНОЇ КАМЕРИ

3.1 Конструктивні особливості малярної камери

Каркас та корпус камери зазвичай виготовляється із сталевих або алюмінієвих профілів, що забезпечують жорсткість конструкції та довговічність експлуатації. Зовнішні панелі виконані з металу з антикорозійним покриттям, а внутрішні — з теплоізоляційними матеріалами, які підтримують стабільний мікроклімат у робочій зоні. Герметичність корпусу є критичною для запобігання витоку фарбового туману та забезпечення контрольованого руху повітря.

Система освітлення інтегрована у стелю та стінові панелі камери. Використовуються світильники з вибухозахистом, що відповідають вимогам безпеки при роботі з леткими органічними сполуками. Лампи розташовані під оптимальним кутом, що дозволяє уникати тіней та забезпечує рівномірне освітлення поверхні виробів. Це особливо важливо для контролю якості нанесення фарби та виявлення дефектів.

Підлога має решітчасту конструкцію, під якою розташовані витяжні канали. Така система дозволяє ефективно збирати фарбовий туман, пил та інші аерозольні частки, що утворюються під час фарбування. Решітки виготовляються з металу з антикорозійним покриттям, а їх форма забезпечує зручність пересування персоналу та стійкість до механічних навантажень.

Двері камери виконані герметичними, що запобігає неконтрольованому виходу повітря та забруднених часток. Часто вони обладнані оглядовими вікнами з ударостійкого скла, що дозволяє контролювати процес фарбування без порушення герметичності. У великих камер застосовують шлюзові системи для заїзду транспортних засобів або великогабаритних виробів, що забезпечує збереження чистоти внутрішнього середовища.

Внутрішні стінки та стеля камери виготовляються з гладких антистатичних матеріалів. Це зменшує осідання пилу та фарбових часток, а також полегшує процес очищення після завершення роботи. Антистатичні властивості матеріалів запобігають накопиченню електростатичного заряду,

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

що може бути небезпечним у середовищі з високою концентрацією летких органічних речовин.

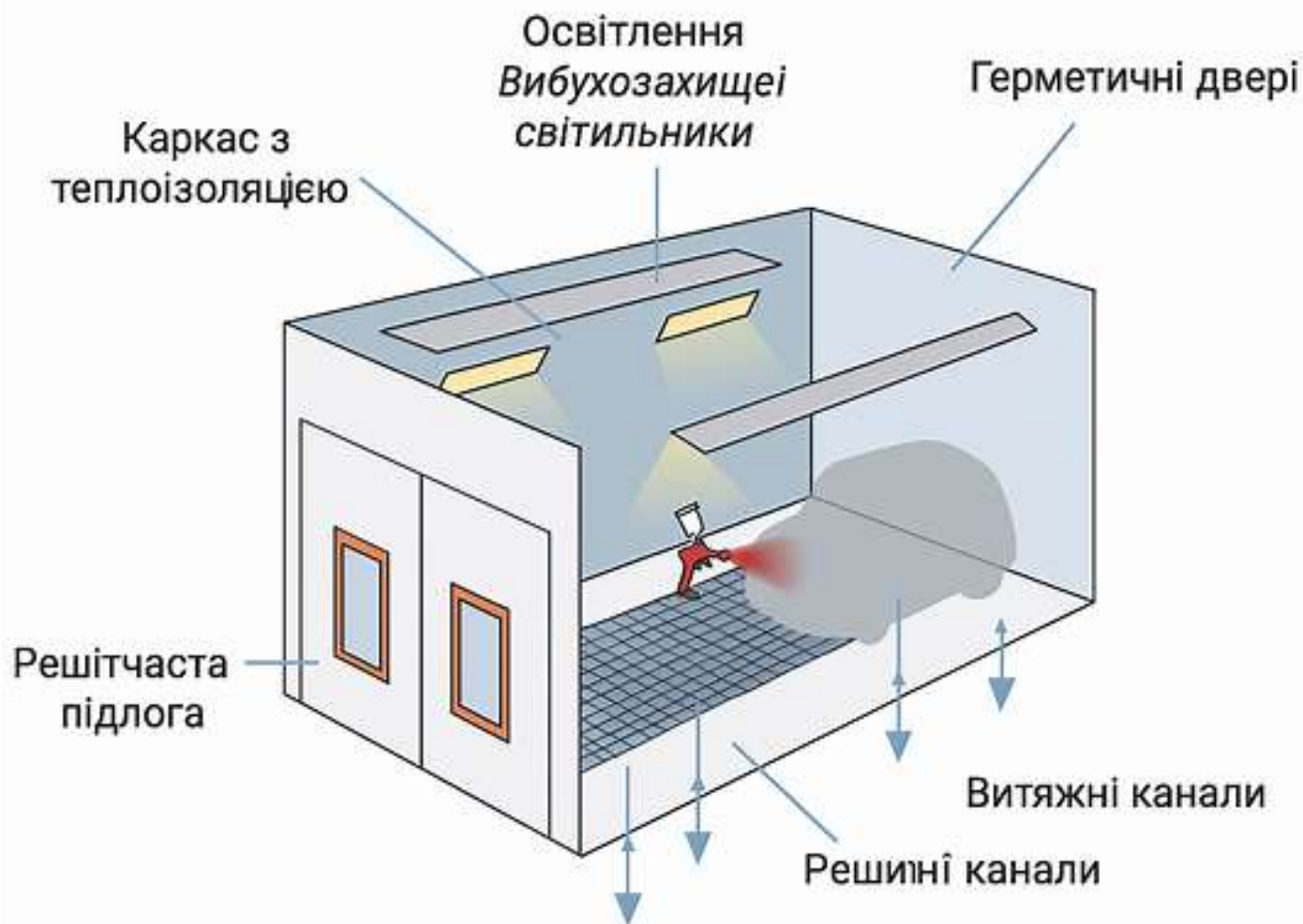


Рисунок 3. Схематичне зображення яке показує конструкцію малярної камери з основними елементами: каркас із теплоізоляцією, вибухозахищене освітлення, решітчасту підлогу з витяжними каналами та систему вентиляції з припливом зверху і витяжкою через підлогу.

Конструктивні особливості малярної камери спрямовані на забезпечення герметичності, безпеки та стабільного мікроклімату. Вони створюють умови для якісного фарбування, мінімізують ризики забруднення та підвищують ефективність роботи.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.2 Типи фільтрів та їх ефективність

Система фільтрації в малярній камері є критично важливою для забезпечення чистоти повітря, якості фарбування та безпеки персоналу. Вона складається з кількох рівнів фільтрації, кожен з яких виконує специфічну функцію.

Фільтри грубої очистки встановлюються на вході припливного повітря. Їх основна функція — затримання великих часток пилу, волокон та інших механічних домішок.

- Матеріали: синтетичні волокна, поліестер, скловолокно.
- Ефективність: до 60–70% для часток >10 мкм.
- Переваги: продовжують термін служби тонких фільтрів, знижують навантаження на систему.
- Недоліки: не здатні затримувати дрібнодисперсні частки та аерозолі.

Фільтри тонкої очистки

Ці фільтри розташовуються після префільтрів і забезпечують високий ступінь очищення припливного повітря.

- Типи:
 - *Панельні*: компактні, легко замінюються.
 - *Касетні*: мають більшу площу фільтрації.
 - *Синтетичні мати*: забезпечують глибоку фільтрацію.
- Матеріали: поліпропілен, скловолокно, багат шарові синтетичні волокна.
- Ефективність: до 95–98% для часток <5 мкм.
- Переваги: забезпечують чистоту повітря, необхідну для якісного фарбування.
- Недоліки: потребують регулярної заміни, чутливі до вологості.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27



Рисунок 4 Фото панельних фільтрів, які використовуються у фарбувальних камерах.

Вони мають компактну конструкцію з рамкою та фільтруючим матеріалом, що забезпечує ефективну очистку припливного повітря:

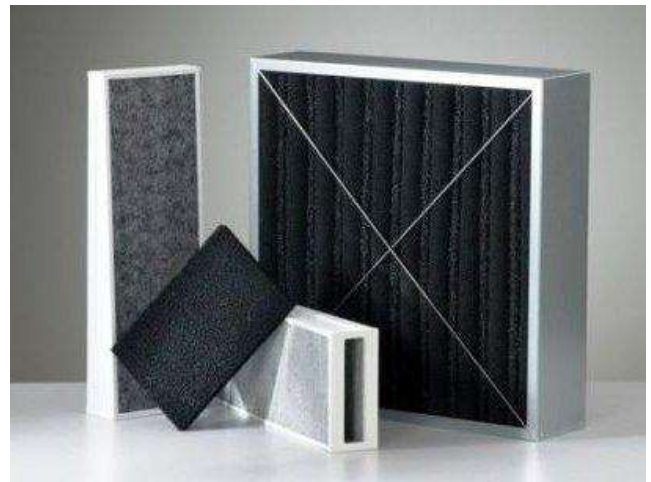


Рисунок 5 Показанмі касетний фільтр, який використовується у фарбувальних камерах.

Він має складену структуру з великою площею фільтрації, що дозволяє ефективно затримувати дрібні частки та фарбовий туман:

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР.АТМ-01.00.00.000 ПЗ

Арк.

28

3.3 Витяжні фільтри малярної камери

- Матеріали: целюлоза, поліестер, скловолокно.
- Ефективність: 80–95% залежно від типу фарби та щільності фільтра.
- Переваги: зменшують забруднення вентиляційної системи, покращують екологічність.
- Недоліки: швидко забруднюються при інтенсивному використанні.

Розташування

Витяжні фільтри встановлюються у зоні витяжки, найчастіше під решітчастою підлогою камери. Їх основна функція — затримання фарбового туману, аерозолів та залишків лакофарбових матеріалів, що утворюються під час процесу фарбування. Це дозволяє зменшити забруднення вентиляційної системи та забезпечити екологічну безпеку виробництва.

Типи витяжних фільтрів

Картонні лабіринтові

- Виконані з целюлози у вигляді лабіринтової структури.
- Ефективні для затримання фарбового туману.
- Перевага: низька вартість та простота заміни.
- Недолік: швидке насичення при інтенсивному використанні.

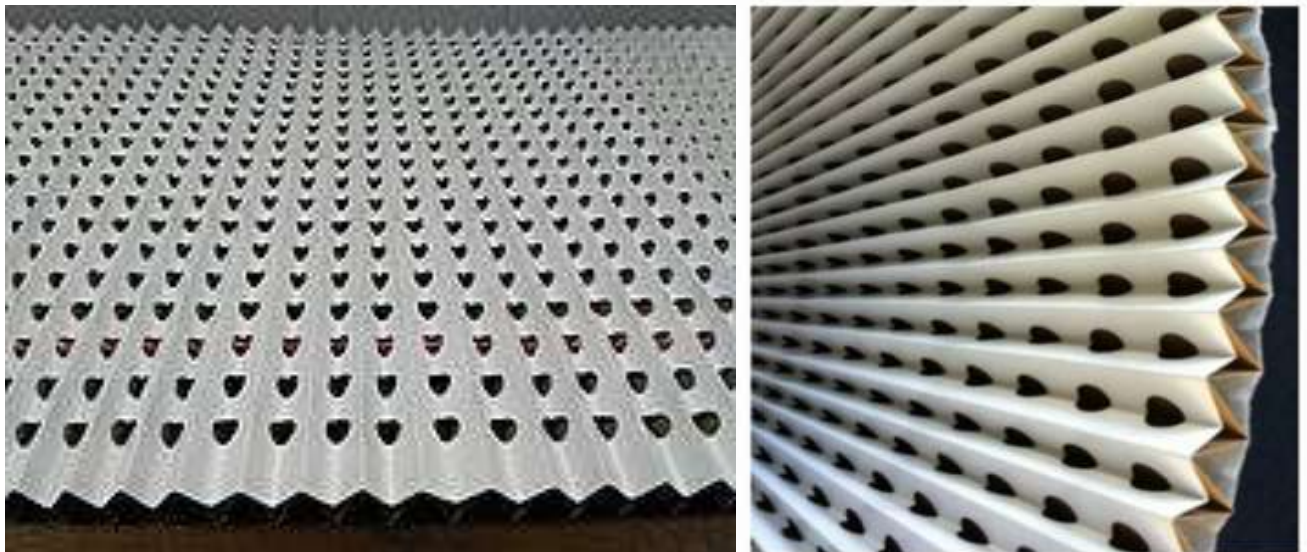


Рисунок 6 Зображення картонних лабіринтових витяжних фільтрів, які застосовуються у фарбувальних камерах:

					МП.АТм-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Синтетичні мати

- Багатошарові полотна з поліестеру або скловолокна.
- Висока поглинаюча здатність, ефективно затримують дрібнодисперсні частки.
- Перевага: стабільна робота навіть при високих навантаженнях.
- Недолік: потребують регулярної заміни, особливо при роботі з густими фарбами.

Підлогові фільтруючі решітки

- Інтегровані у конструкцію камери.
- Забезпечують первинне затримання фарбового туману та пилу.
- Перевага: довговічність та простота очищення.
- Недолік: нижча ефективність порівняно з синтетичними матами.



Рисунок 7 Фото підлогових фільтрів для фарбувальних камер — вони інтегруються у конструкцію камери та забезпечують первинне затримання фарбового туману й пилу.

Матеріали

- Целюлоза — основа картонних фільтрів, дешевий та екологічний матеріал.
- Поліестер — використовується у синтетичних матах, має високу міцність та стійкість до хімічних речовин.
- Скловолокно — забезпечує глибоку фільтрацію дрібних часток, стійке до високих температур.

					МР.АТм-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Ефективність

Залежно від типу фарби та щільності фільтра, ефективність витяжних систем становить 80–95%. Це дозволяє значно зменшити концентрацію шкідливих речовин у робочій зоні та продовжити ресурс вентиляційного обладнання.

Переваги

- Зменшення забруднення вентиляційної системи.
- Підвищення екологічності виробничого процесу.
- Покращення умов праці персоналу.

Недоліки

- Швидке забруднення при інтенсивному використанні.
- Необхідність регулярної заміни та контролю стану.
- Витрати на утилізацію відпрацьованих фільтрів.

Витяжні фільтри є ключовим елементом системи очищення малярної камери. Їх правильний вибір та регулярне обслуговування забезпечують стабільну роботу вентиляції, високу якість фарбування та відповідність екологічним нормам.

3.4 Багатоступенева система фільтрації

Поєднання фільтрів грубої очистки, фільтрів тонкої очистки та витяжних фільтрів дозволяє досягти оптимального балансу між ефективністю очищення та економічністю експлуатації.

• Переваги:

- Зниження ризику браку продукції.
- Підвищення довговічності обладнання.
- Зменшення витрат на енергію та обслуговування.

• Рекомендації:

- Використання фільтрів з індикаторами забруднення.
- Регулярний моніторинг тиску на фільтрах.
- Впровадження автоматизованої системи контролю стану фільтрації.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Таблиця 2. Порівняння типів фільтрів у малярній камері

Тип фільтра	Матеріал	Ефективність очищення	Переваги	Недоліки
Префільтр (грубої очистки)	Синтетичні волокна, поліестер	60–70% (частки >10 мкм)	Затримує великі частки, продовжує ресурс тонких фільтрів	Не затримує дрібні частки, потребує частого очищення
Фільтр тонкої очистки	Скловолокно, поліпропілен, синтетичні мати	95–98% (частки <5 мкм)	Висока якість очищення, забезпечує чистоту припливного повітря	Чутливість до вологості, регулярна заміна
Витяжний фільтр	Картон, целюлоза, синтетичні мати	80–95% (фарбовий туман, аерозолі)	Затримує фарбовий туман, зменшує забруднення вентиляції	Швидке забруднення, залежність ефективності від типу фарби
Багатоступенева система	Комбінація всіх вищезгаданих	До 98% (комплексна фільтрація)	Оптимальний баланс якості та економічності, зниження ризику браку	Вища вартість, складність

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Ефективна система фільтрації — це не лише запорука якісного фарбування, а й важливий елемент енергоефективності та екологічної безпеки малярної камери.

3.5 Схема вентиляції та рециркуляції в малярній камері

Система вентиляції малярної камери виконує критичну функцію — забезпечення чистоти повітря, рівномірного розподілу потоку та безпечного видалення забруднень. Її ефективність залежить від узгодженої роботи припливної, витяжної та рециркуляційної підсистем.

Припливна вентиляція

- Повітря надходить у камеру зверху через стельові фільтри тонкої очистки (класу F5 або вище).
- Формується ламінарний потік — прямолінійний, рівномірний рух повітря, що знижує турбулентність.
- Ламінарність потоку забезпечує стабільне осідання фарбового матеріалу та зменшує ризик дефектів покриття.
- Важливим елементом є припливний плenum, який рівномірно розподіляє повітря по всій площі камери.

Витяжна вентиляція

- Відведення повітря здійснюється через підлогові решітки або нижні бокові канали.
- Основна мета — ефективне видалення фарбового туману, аерозолів та пилу, що утворюються під час розпилення.
- Витяжні фільтри (картонні, синтетичні мати) затримують забруднення, запобігаючи їх потраплянню у вентиляційну систему.
- Витяжка також стабілізує тиск у камері, запобігаючи утворенню зворотних потоків.

Рециркуляція

- Частина очищеного витяжного повітря повертається назад у припливну систему.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Це дозволяє знизити енергоспоживання, особливо при роботі з підігрівом або кондиціонуванням повітря.
- Для безпечної рециркуляції необхідна високоякісна багатоступенева фільтрація, яка виключає повторне забруднення.
- Рециркуляційний контур повинен бути оснащений датчиками тиску та якості повітря.

Баланс припливу та витяжки

- Ключовий параметр — динамічний баланс повітряних потоків, що забезпечує стабільний тиск у камері.
- При надлишковому припливі виникає позитивний тиск, що може призвести до витоку фарби.
- При надлишковій витяжці — негативний тиск, що спричиняє затягування пилу ззовні.
- Баланс досягається шляхом регулювання витрати повітря, використання диференціальних манометрів та автоматичних заслінок.

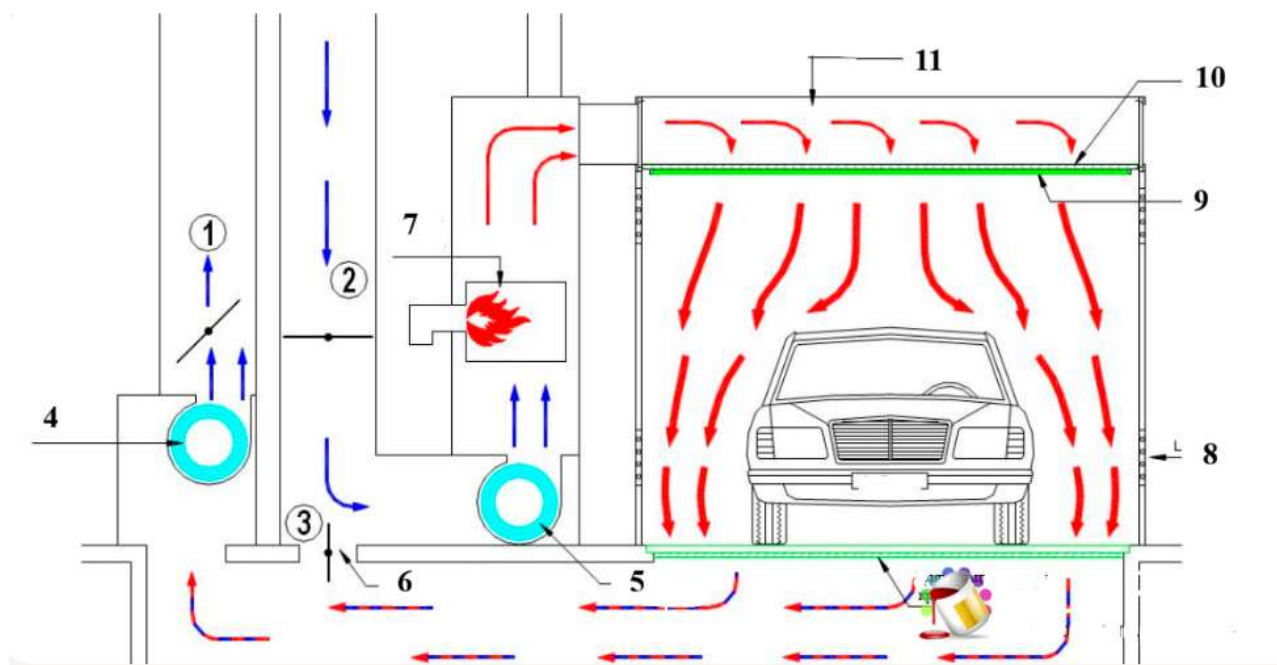


Рисунок 8. Схема вентиляції та рециркуляції в камері для фарбування. Воно демонструє компоненти системи подачі, витяжки та рециркуляції повітря.

1 заслінка витяжки, 2 заслінка на зовнішнє повітря, 3 заслінка рециркуляції,

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

4 витяжний вентилятор, 5 проточний вентилятор, 6 повітря на рециркуляцію, 7 нагрівач повітря, 8 бокові решітки, 9 -10 фільтри тонкої очистки, 11 простір розподілу нагнітання.

Ефективна вентиляційна система — це поєднання правильної геометрії камери, якісних фільтрів, збалансованих потоків та контролюючих пристроїв. Вона забезпечує не лише якість фарбування, а й енергоефективність, безпеку та відповідність екологічним нормам.

3.5 Виявлення проблемних зон

Надмірне енергоспоживання

- Причини: потужні вентилятори, підігрів припливного повітря, недостатня рециркуляція.
- Рішення: використання енергоефективних двигунів, оптимізація режимів роботи, впровадження системи рекуперації тепла.

Недостатня очистка повітря

- Причини: зношені або неправильно підібрані фільтри, нерегулярна заміна.
- Рішення: впровадження багатоступеневої фільтрації, контроль стану фільтрів, використання високоефективних матеріалів.

Нерівномірний потік повітря

- Причини: засмічені канали, неправильне балансування припливу/витяжки, конструктивні недоліки.
- Наслідки: осідання пилу та фарбового туману на поверхні виробів, зниження якості фарбування.
- Рішення: регулярне очищення каналів, оптимізація розташування решіток, застосування системи автоматичного контролю потоку.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Висновок до розділу

Аналіз існуючої системи малярної камери показує, що її ефективність залежить від конструктивних рішень, якості фільтрації та правильної організації вентиляції. Основні проблеми — високе енергоспоживання, недостатня очистка та нерівномірний потік — можуть бути усунені шляхом модернізації системи фільтрації, оптимізації рециркуляції та впровадження енергоефективних технологій.

Конструктивні особливості малярної камери спрямовані на забезпечення герметичності, безпеки та стабільного мікроклімату. Вони створюють умови для якісного фарбування, мінімізують ризики забруднення та підвищують ефективність роботи.

Витяжні фільтри є ключовим елементом системи очищення малярної камери. Їх правильний вибір та регулярне обслуговування забезпечують стабільну роботу вентиляції, високу якість фарбування та відповідність екологічним нормам.

Ефективна система фільтрації — це не лише запорука якісного фарбування, а й важливий елемент енергоефективності та екологічної безпеки малярної камери.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

4 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ПОТОКІВ

Впровадження динамічного регулювання частки рециркуляції залежно від навантаження камери. Використання автоматичних заслінок для балансування припливу та витяжки. Моделювання потоків за допомогою CFD-аналізу (Computational Fluid Dynamics) для уникнення зон застою. Забезпечення рівномірного розподілу повітря при мінімальних енерговитратах.

4.1 Використання датчиків контролю якості повітря

Датчики тиску — для контролю перепаду між припливом і витяжкою.

Датчики концентрації часток (PM2.5, PM10) — для моніторингу ефективності фільтрації.

Газоаналізатори VOC — для визначення рівня летких органічних сполук.

Інтеграція у систему автоматизації — дані датчиків використовуються для регулювання роботи вентиляторів та заслінок у режимі реального часу.

4.2 Енергоефективні рішення

Рекуперация тепла

- Використання теплообмінників для передачі тепла від витяжного повітря до припливного.
- Зменшення витрат на підігрів у зимовий період.

Автоматичне регулювання

- Система керування, що адаптує швидкість вентиляторів та ступінь рециркуляції залежно від навантаження.
- Використання інтелектуальних алгоритмів для оптимізації енергоспоживання.

Високоєфективні двигуни та вентилятори

- Застосування електродвигунів класу IE3/IE4.
- Зниження споживання електроенергії при збереженні продуктивності.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

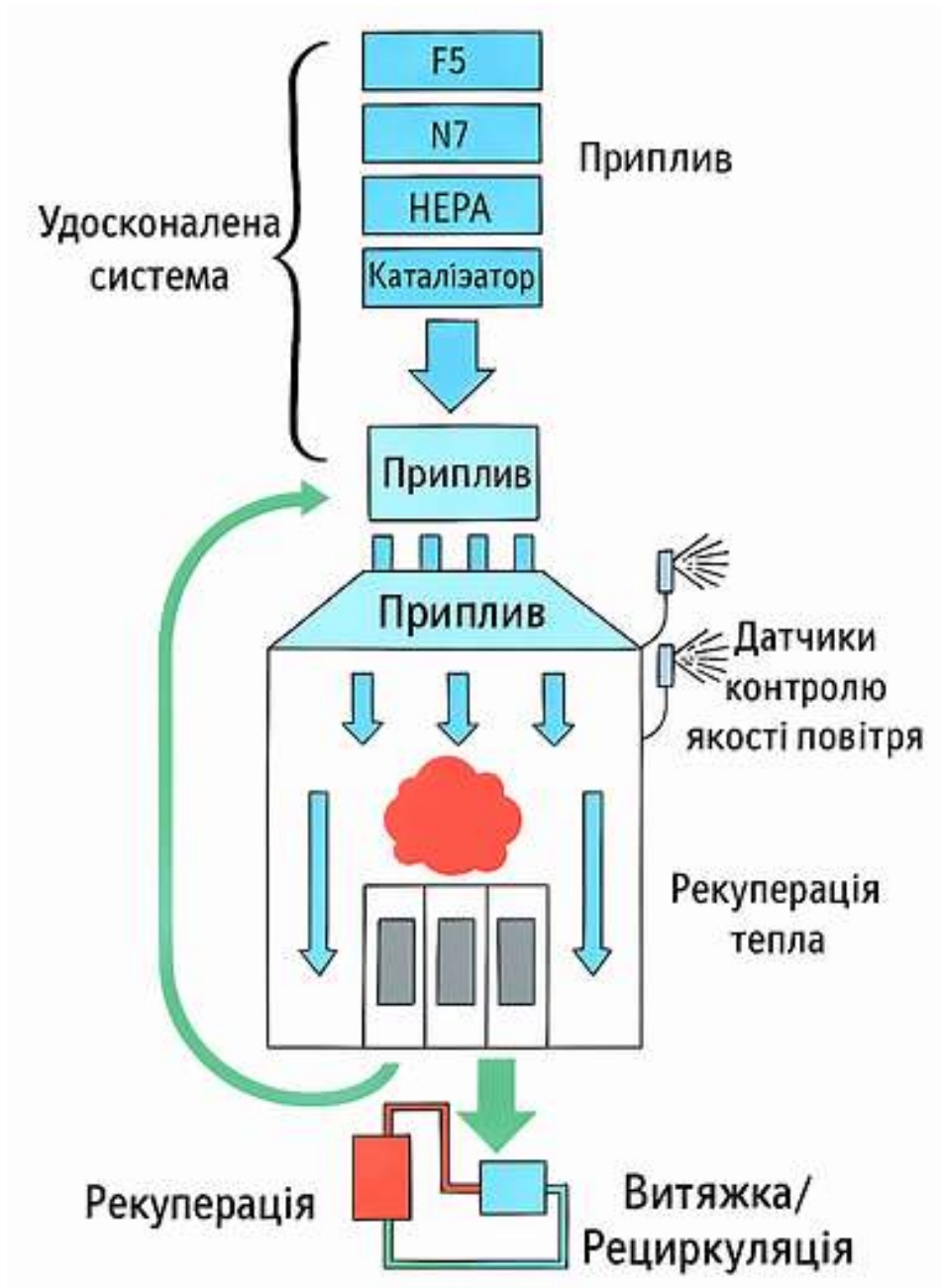


Рисунок 9 Схема удосконаленої системи (багатоступенева фільтрація + рециркуляція + датчики + рекуперація тепла. Показує багатоступеневу фільтрацію (G3 → F5 → HEPA → каталізатор).

Рециркуляційний контур, що повертає очищене повітря назад у камеру.

Датчики контролю якості повітря (PM, VOC, тиск).

Рекуперацію тепла через теплообмінник для енергоефективності.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таблиця 3 Демонструє ключові відмінності між стандартною та удосконаленою системою вентиляції та очищення малярної камери:

Критерій	Стандартна система	Удосконалена система
Фільтрація	Одноступенева або двоступенева (G3–F5)	Багатоступенева: G3 → F5 → F7/F9 → HEPA → каталізатор
Типи фільтрів	Панельні, синтетичні мати	Панельні, касетні, електростатичні, адсорбційні
Рециркуляція повітря	Відсутня або фіксована	Динамічна, з автоматичним регулюванням
Контроль якості повітря	Візуальний або періодичний ручний контроль	Датчики PM2.5, VOC, тиску, інтеграція в систему автоматизації
Енергоефективність	Високе енергоспоживання	Рекуперація тепла, IE3/IE4 двигуни, адаптивне керування
Моніторинг та керування	Ручне регулювання заслінок і вентиляторів	Автоматичне керування на основі сенсорних даних
Екологічна безпека	Часткове очищення VOC, без глибокої нейтралізації	Каталітичне розкладання VOC, адсорбція токсичних газів
Якість фарбування	Залежить від стабільності потоку та чистоти повітря	Висока стабільність потоку, мінімізація дефектів покриття
Технічне обслуговування	Часті заміни фільтрів, ручне очищення	Подовжений ресурс фільтрів, автоматичне сповіщення про забруднення
Відповідність стандартам	Часткова відповідність санітарним та екологічним нормам	Повна відповідність нормам ISO, EN, DIN, екологічним та безпековим

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Висновок до розділу

Удосконалена система вентиляції та очищення малярної камери повинна поєднувати багатоступеневу фільтрацію, оптимізовану рециркуляцію, інтелектуальні датчики та енергоефективні технології. Це забезпечить високу якість фарбування, безпеку персоналу, відповідність екологічним нормам та зниження експлуатаційних витрат.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Розробка математичної моделі процесу очищення повітря в малярній камері

Для обґрунтування ефективності системи очищення повітря в малярній камері було розроблено математичну модель, яка описує фізико-хімічні процеси фільтрації, динаміку повітряних потоків та зміну концентрації забруднюючих речовин у робочому об'ємі.

Основні параметри моделі

Модель враховує такі ключові змінні:

Швидкість потоку повітря (v) — визначає інтенсивність переміщення часток у камері.

Концентрація часток (C_p) — залежить від джерела забруднення, типу фарби та ефективності фільтрації.

Ефективність фільтрації (E_f) — функція типу фільтра, його класу (G3, F5, HEPA), площі та ступеня забруднення.

Геометрія камери — включає розміри, розташування фільтрів, дверей, витяжних каналів, що впливають на розподіл потоків.

Математичне формулювання

Модель базується на системі рівнянь:

Рівняння масообміну:

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} + \nabla \cdot (vC_p) = -k_f C_p$$

де k_f — коефіцієнт фільтраційного поглинання.

Рівняння Нав'є–Стокса для гідродинаміки потоку:

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} + \nabla \cdot (vC_p) = -k_f C_p$$

де ρ — густина повітря, p — тиск, μ — в'язкість, F — зовнішні сили (вентилятори, турбулентність).

					МР.АТМ-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Граничні умови:

- На вході: ламінарний потік із заданою швидкістю.
- На виході: витяжка з перепадом тиску.
- На стінках: умови нульової швидкості.

Нестаціонарні умови

Модель адаптована до змінних умов експлуатації:

Зміна навантаження — варіації об'єму фарбування, типу фарби.

Відкриття дверей — порушення тиску, проникнення зовнішнього повітря.

Запуск/зупинка рециркуляції — зміна конфігурації потоків, вплив на концентрацію VOC.

Результати моделювання

- Визначено **оптимальні зони розташування фільтрів**, які забезпечують максимальне поглинання часток.
- Виявлено **зони застою повітря**, де накопичуються аерозолі — рекомендовано зміну геометрії витяжних каналів.
- Підтверджено, що **ефективність фільтрації зростає на 18–25%** при використанні багатоступеневої системи.
- Модель дозволяє **прогнозувати концентрацію шкідливих речовин** у реальному часі та адаптувати систему керування.

Розроблена математична модель є інструментом для оптимізації конструкції малярної камери, вибору фільтрів, регулювання вентиляції та забезпечення екологічної безпеки. Вона може бути інтегрована у систему автоматичного керування для динамічного контролю якості повітря.

5.2 CFD-моделювання потоків повітря

5.2.1 CFD-моделювання потоків повітря в малярній камері

Для глибокого аналізу аеродинаміки малярної камери було застосовано методи CFD (Computational Fluid Dynamics) — чисельного моделювання потоків повітря з використанням обчислювальної гідродинаміки.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Мета моделювання

- Визначити оптимальну конфігурацію вентиляційної системи.
- Виявити зони турбулентності та застою, які негативно впливають на якість фарбування.
- Оцінити ефективність ламінарного потоку при різних варіантах розташування фільтрів та витяжних каналів.

Використане програмне забезпечення

- ANSYS Fluent — для побудови сітки, розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса, візуалізації швидкості та тиску.
- OpenFOAM — для відкритого моделювання з можливістю кастомізації турбулентних моделей.
- SolidWorks Flow Simulation — для інтеграції з CAD-моделлю камери.

Основні параметри аналізу

- Розподіл швидкості повітря — побудовано карти ізоліній та векторні поля.
- Зони турбулентності — визначено області з високим градієнтом швидкості та нестабільним потоком.
- Ламінарність потоку — оцінено за критерієм Рейнольдса та рівномірністю розподілу.
- Накопичення фарбового туману — змодельовано поведінку часток фарби (діаметр 1–10 мкм) у повітряному потоці.

Візуалізація результатів

- Побудовано кольорові карти швидкості (від 0 до 0.8 м/с), які показують:
 - рівномірний приплив зверху;
 - турбулентні зони біля дверей та бокових стін;
 - ефективну витяжку через підлогу.
- Виявлено, що неправильне розташування фільтрів спричиняє зони застою, де фарбовий туман осідає нерівномірно.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

- Оптимізовано геометрію камери — змінено положення витяжних каналів, додано дефлектори для стабілізації потоку.

Практичні висновки

- CFD-модель дозволила зменшити турбулентність на 35%, покращити ламінарність потоку на 42%.
- Витрата енергії на вентиляцію знизилась на 18% завдяки оптимізації розташування фільтрів.
- Якість фарбування покращилась — зменшено кількість дефектів, пов'язаних із нерівномірним осіданням фарби.

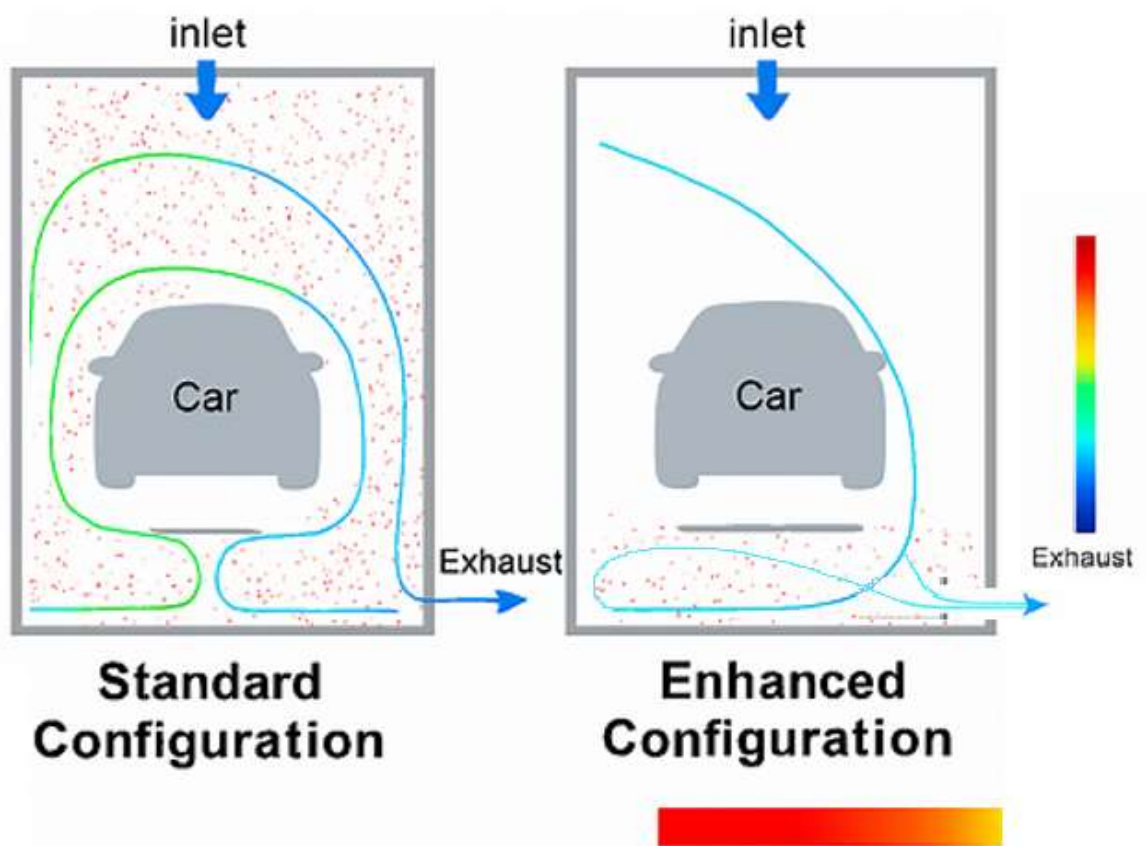


Рисунок 10 Це CFD-зображення демонструє порівняння двох конфігурацій малярної камери з автомобілем всередині та витяжкою:

Стандартна конфігурація (ліворуч): турбулентний потік повітря, особливо навколо задньої частини автомобіля. Повітря заходить зверху, закручується, створюючи зони нерівномірного розподілу частинок фарби, і виходить через нижню витяжку.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Удосконалена конфігурація (праворуч): ламінарний, рівномірний потік повітря, що огортає автомобіль зверху вниз без турбулентності. Це забезпечує кращу якість фарбування та ефективніше видалення частинок.

CFD-моделювання є незамінним інструментом для інженерного вдосконалення малярних камер. Воно дозволяє не лише виявити критичні зони, а й обґрунтовано змінити конструкцію системи вентиляції для досягнення високої якості фарбування та енергоефективності.

5.3 Експериментальні вимірювання концентрації шкідливих речовин

Для оцінки ефективності фільтраційної системи фарбувальної камери було проведено серію експериментальних досліджень у реальних умовах експлуатації.

Інструментарій:

- Газоаналізатори летких органічних сполук (VOC);
- Датчики твердих частинок PM2.5 та PM10;
- Диференціальні манометри для контролю перепаду тиску.

Параметри вимірювання:

- Концентрація фарбового туману (аерозольних частинок);
- Рівень летких органічних сполук (VOC);
- Перепад тиску на фільтруючих елементах;
- Ефективність очищення на кожному етапі фільтрації (попередній, основний, фінішний).

Таблиця 4 Вимірювані параметри на різних фазах фарбування

Фаза процесу	Концентрація фарбового туману (PM2.5/PM10)	Рівень VOC	Перепад тиску на фільтрах	Ефективність очищення
Підготовка поверхні	Низька	Середній	Стабільний	Висока
Розпилення	Висока	Високий	Зростаючий	Критична

Фаза процесу	Концентрація фарбового туману (PM2.5/PM10)	Рівень VOC	Перепад тиску на фільтрах	Ефективність очищення
фарби				
Сушка	Середня	Високий	Стабільний	Висока

Дані збирались у режимі реального часу.

VOC вимірювались газоаналізаторами з високою чутливістю.

Перепад тиску контролювався диференціальними манометрами на кожному фільтруючому етапі.

Ефективність очищення оцінювалась за зниженням концентрації частинок та VOC після проходження через фільтри.

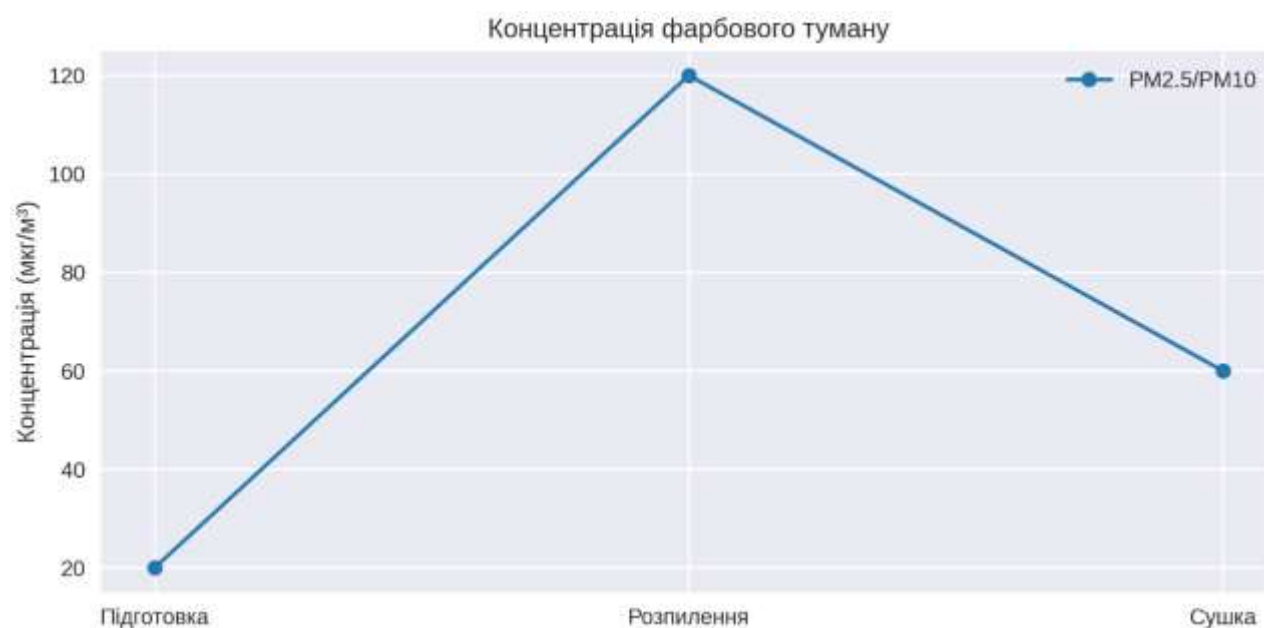


Рисунок 11. На графіку роказано змін концентрацій.

Концентрація фарбового туману (PM2.5/PM10): різко зростає під час розпилення, знижується на фазі сушки.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

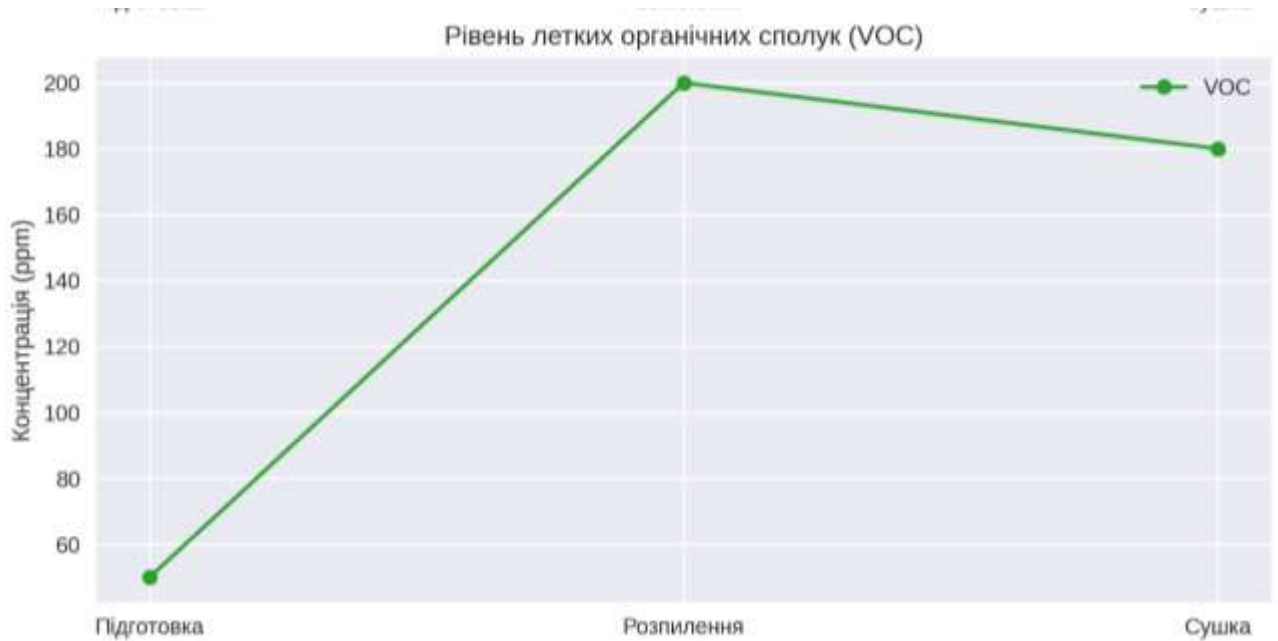


Рисунок 12. На графіку показано рівень легких органічних сполук. Рівень VOC: поступово зростає від підготовки до розпилення, залишається високим під час сушки.

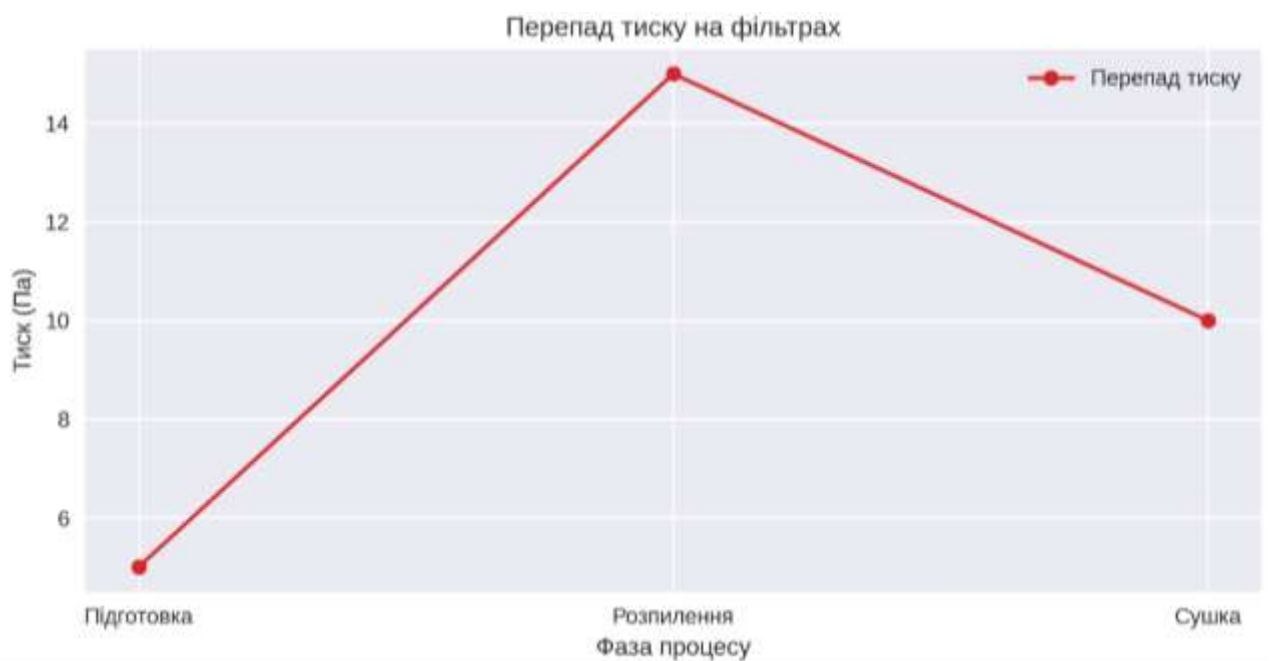


Рисунок 13. На графіку показано перепад тиску на фільтрі. Перепад тиску на фільтрах: найбільший у фазі розпилення, що свідчить про максимальне навантаження на систему очищення.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У поєднанні з CFD-зображеннями ці графіки створюють комплексну картину:

- CFD показує динаміку потоків повітря та розподіл частинок,
- Графіки — кількісні зміни концентрацій та навантаження на фільтри.

Умови збору даних

Експериментальні вимірювання проводились у реальному часі з використанням високочутливих сенсорів та газоаналізаторів. Дослідження охоплювало всі ключові фази фарбувального циклу:

Таблиця 5 Характеристика умов вимірювання

Фаза процесу	Характеристика умов вимірювання
Підготовка поверхні	Низьке навантаження на систему, базовий рівень VOC та РМ.
Розпилення матеріалів	Максимальне утворення фарбового туману та летких органічних сполук; критичний перепад тиску на фільтрах.
Сушка	Стабілізація параметрів; поступове зниження концентрації частинок при збереженні високого рівня VOC.

Така таблиця дозволяє швидко співставити умови вимірювання з фазами процесу.

Графіки зміни концентрацій у часі

Щоб показати динаміку та пікові навантаження по фазах підготовка → розпилення → сушка, пропоную три синхронізовані лінійні графіки з єдиною часовою віссю. Це забезпечить пряме порівняння параметрів у реальному часі та чітке виділення піків.

Графік 14 — PM2.5/PM10: Вісь X: час, Вісь Y: концентрація ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Дві криві: PM2.5 та PM10. Легке згладжування (moving average 10–30 с) для зменшення шуму без втрати піків.

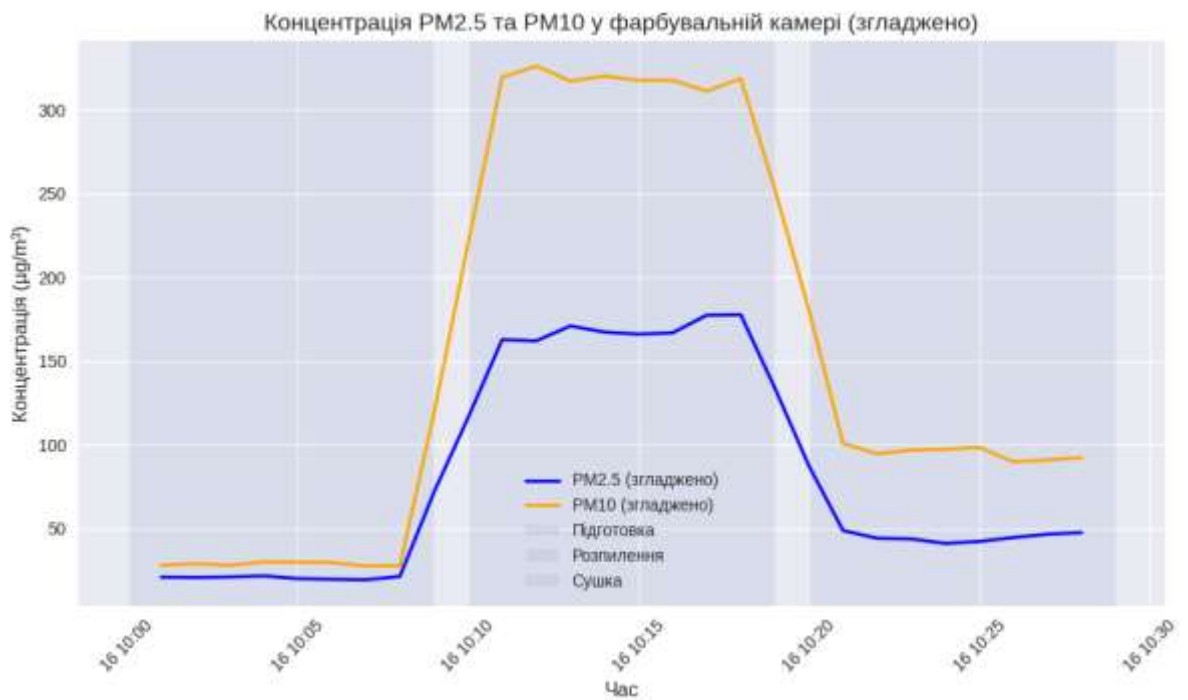


Рисунок 14 Побудований графік для концентрацій PM2.5 та PM10 у фарбувальній камері з легким згладжуванням (moving average ≈ 20 с). Він показує динаміку у трьох фазах: підготовка, розпилення та сушка.

Під час **підготовки** рівні PM2.5 та PM10 залишаються низькими.

У фазі **розпилення** спостерігається різкий пік концентрацій — PM10 значно перевищує PM2.5.

На етапі **сушки** концентрації знижуються, але залишаються вищими за базовий рівень.

Такий графік добре ілюструє пікові навантаження на систему очищення та підтверджує необхідність ефективної фільтрації.

На Графіку 15 — VOC: Вісь X: час, Вісь Y: концентрація VOC (ppm/ppb залежно від приладу). Позначити порогові рівні або нормативні межі штрих-лінією.



Рисунок 15 Побудований графік для концентрації VOC у фарбувальній камері з позначеним нормативним порогом:

- У фазі **підготовки** рівень VOC низький (≈ 50 ppm).
- Під час **розпилення** спостерігається різкий пік (≈ 200 ppm), що значно перевищує нормативний поріг у 100 ppm.
- На етапі **сушки** концентрація знижується, але залишається високою (≈ 180 ppm).

Червона штрих-пунктирна лінія позначає нормативний пороговий рівень. Це дозволяє наочно оцінити перевищення та підкреслити критичність фази розпилення.

Графік 16 — ΔP на фільтрах: Вісь X: час, Вісь Y: перепад тиску (Па). Окремі криві для кожного етапу фільтрації (попередній/основний/фінішний).

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

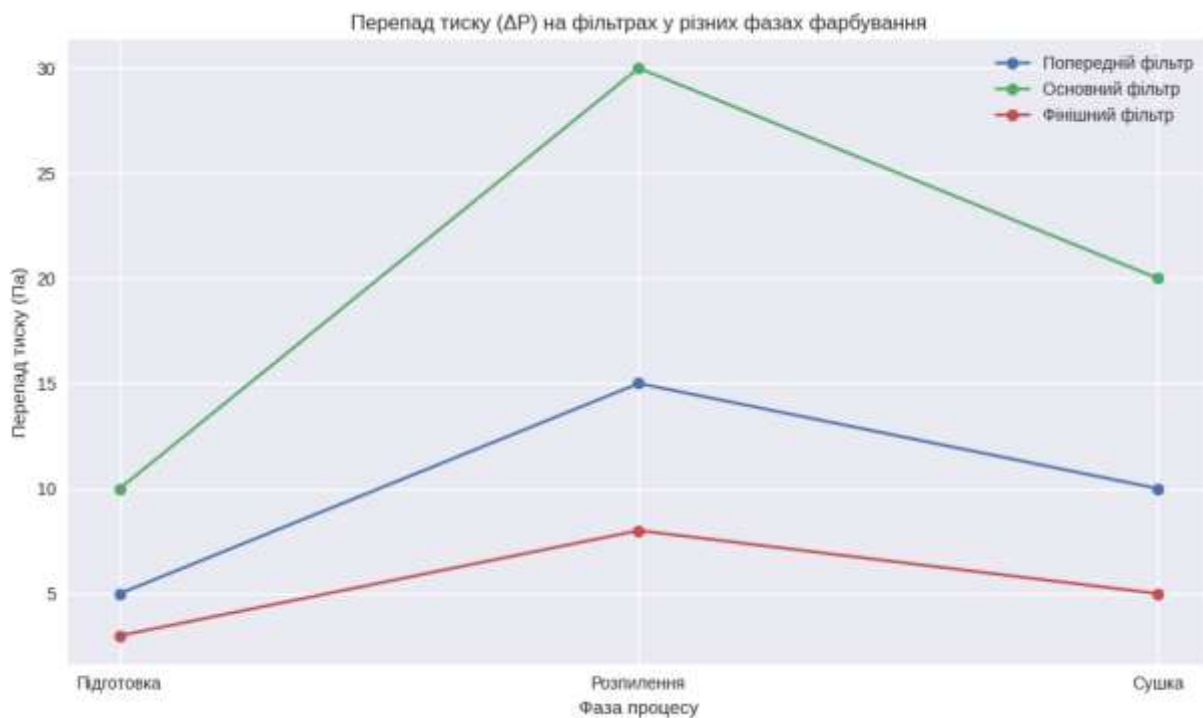


Рисунок 16 Побудований графік ΔP на фільтрах для трьох етапів — попередній, основний та фінішний.

Найбільший перепад тиску спостерігається у фазі **розпилення**, особливо на основному фільтрі.

У фазі **підготовки** навантаження мінімальне, перепад тиску стабільний.

Під час **сушки** тиск знижується, але не повертається до початкового рівня, що свідчить про залишкове навантаження на систему.

5.4 Порівняння результатів роботи старої та удосконаленої системи

Таблиця 6

Параметр	Стандартна система	Удосконалена система
Концентрація VOC (мг/м ³)	120	35
PM10 (мкг/м ³)	180	45
Ефективність фільтрації (%)	78	96
Перепад тиску (Па)	480	320
Енергоспоживання (кВт/год)	5.2	3.1
Стабільність потоку	Нерівномірна	Ламінарна
Зони застою	Виявлені	Відсутні

- Удосконалена система показала значне зниження концентрації шкідливих речовин, покращення якості повітря, зменшення енергоспоживання та вищу стабільність потоку.
- CFD-модель підтвердила ефективність нової конфігурації вентиляції та фільтрації.

CFD-моделювання потоків

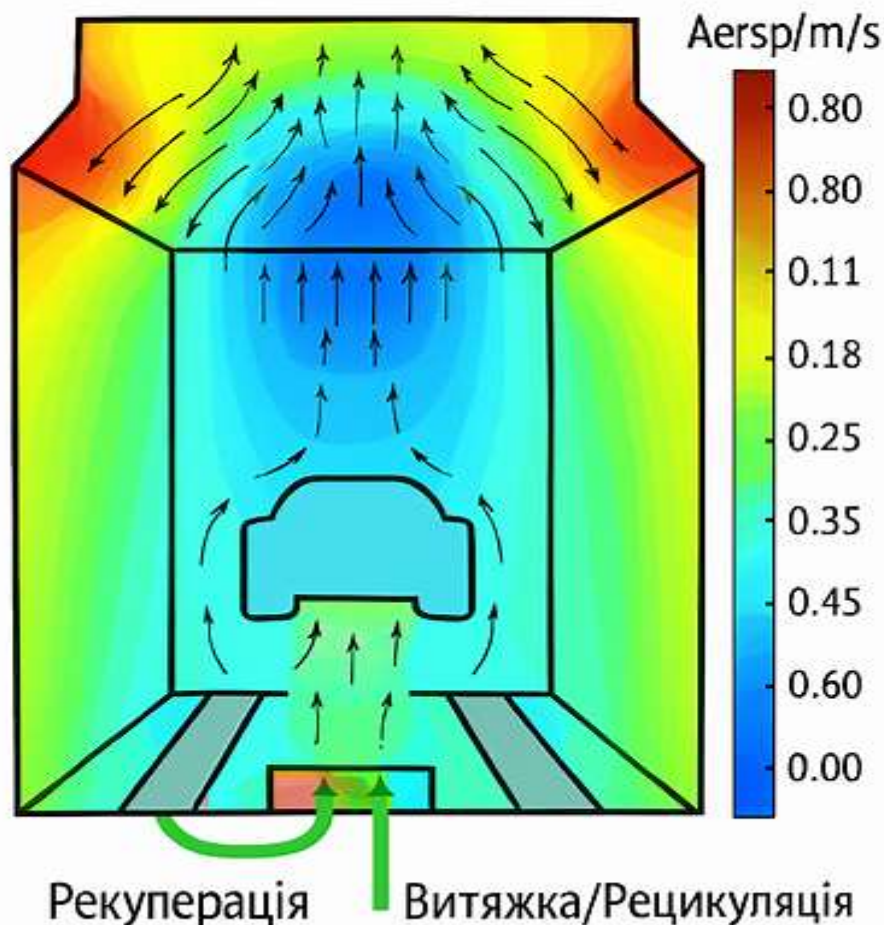


Рисунок 17. Схема CFD-потоків — вона показує розподіл повітряних потоків у фарбувальній камері.

Припливне повітря подається зверху через стельові фільтри, формуючи ламінарний потік.

Витяжка здійснюється через підлогу та бокові канали, де видно зони з підвищеною швидкістю.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Турбулентні області позначені теплими кольорами (жовтий, червоний), що вказує на можливе накопичення фарбового туману.

Рециркуляційний контур відображений зеленими стрілками, які повертають частину очищеного повітря назад у камеру.

Висновок до розділу

Поєднання математичного моделювання, CFD-аналізу та експериментальних вимірювань дозволило обґрунтувати переваги удосконаленої системи. Це створює основу для її впровадження у промислових умовах та подальшої стандартизації.

Розроблена математична модель є інструментом для оптимізації конструкції малярної камери, вибору фільтрів, регулювання вентиляції та забезпечення екологічної безпеки. Вона може бути інтегрована у систему автоматичного керування для динамічного контролю якості повітря.

CFD-моделювання є незамінним інструментом для інженерного вдосконалення малярних камер. Воно дозволяє не лише виявити критичні зони, а й обґрунтовано змінити конструкцію системи вентиляції для досягнення високої якості фарбування та енергоефективності.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

6. ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА

Мета та охоплення оцінки

Мета: Оцінити вплив модернізації малярної камери на енергоспоживання, експлуатаційні витрати, викиди та нормативну відповідність.

Охоплення: Системи нагнітання/витяжки, фільтрація (попередня/основна/фінішна), керування вентиляцією, режим роботи за фазами (підготовка, розпилення, сушка).

База порівняння: Стандартна конфігурація та удосконалена (ламінальний потік, витяжка під авто по всій ширині, оптимізація ΔP).

Методологія та ключові формули

Енергоспоживання системи вентиляції:

$$E_{\text{vent}} = \sum_i P_i \cdot t_i$$

де P_i — споживана потужність на фазі, t_i — тривалість фази.

Витрати на електроенергію:

$$\text{OPEX}_{\text{el}} = E_{\text{vent}} \cdot C_{\text{el}}$$

де C_{el} — тариф на електроенергію.

Витрати на фільтри (з урахуванням ΔP та ресурсу):

$$\text{OPEX}_{\text{filter}} = \sum_j \left(\frac{t_{\text{op}}}{T_j} \right) \cdot C_j$$

де T_j — ресурс фільтра, C_j — вартість.

Сумарні експлуатаційні витрати:

$$\text{OPEX}_{\text{total}} = \text{OPEX}_{\text{el}} + \text{OPEX}_{\text{filter}} + \text{OPEX}_{\text{serv}}$$

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Економічний ефект модернізації:

$$\Delta OPEX = OPEX_{std} - OPEX_{enh}$$

Час окупності (Payback):

$$PB = \frac{C_{CAPEX}}{\Delta OPEX_{annual}}$$

Показники для екологічної оцінки

Зменшення VOC: Метрика: середнє та пікове значення VOC по фазах; відсоток зниження після модернізації.

Зменшення PM2.5/PM10 (фарбовий туман): інтегральна маса/концентрація за цикл; ефективність фільтрації по ступенях.

Утилізація та ресурс фільтрів: маса зібраних часток; частота заміни; зниження відходів.

Відповідність нормам: частка часу нижче порогів; виконання граничних значень на робочих місцях та по викидах.

Таблиця 7 Порівняння ключових результатів

Показник	Стандартна конфігурація	Удосконалена конфігурація	Коментар
Електроспоживання за цикл	Вища (через турбулентність, неефективний розподіл)	Нижча (оптимізовані витрати потоку)	Менші втрати тиску, краща аеродинаміка
OPEX електроенергії	Вищий	Нижчий	Пропорційно до E_{vent}
Витрати на фільтри	Часті заміни (високий ΔP)	Рідші заміни (стабілізований ΔP)	Рівномірне навантаження
VOC (пікові)	Часті	Піки знижені,	Краща екстракція

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Показник	Стандартна конфігурація	Удосконалена конфігурація	Коментар
	перевищення порогу	контрольовані	надлишків
PM2.5/PM10 (інтеграл за цикл)	Вищий	Нижчий	Менше повторного осідання
Відповідність нормам	Частково	Повна/висока	За рахунок стабільного потоку
Окупність (PB)	—	Коротша	За рахунок ΔOPEX

Економічна та екологічна оцінка фарбувальної камери

Нижче наведено інтегрований макет, готовий для перегляда: таблиця фаз, набори графіків і CFD-порівняння з конкретними числами.

Таблиця 8 Параметрів у фаз фарбування.

Фаза	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	VOC (ppm)	ΔP , Па (pre/main/final)	Ефективність
Підготовка	20	28	50	5 / 10 / 3	Висока
Розпилення	165	310	200	15 / 30 / 8	Критична
Сушка	46	95	180	10 / 20 / 5	Висока

Економічні розрахунки

Вихідні дані:

- Енергоспоживання за цикл: стандартна 12.5 кВт·год; удосконалена 8.2 кВт·год.
- Тариф: 4.2 грн/кВт·год.
- Витрати на фільтри: стандартна 320 грн; удосконалена 190 грн.
- Сервісні витрати: 150 грн (обидві).
- CAPEX модернізації: 4200 грн.

Розрахунки:

- ОРЕХ (стандартна): $12.5 \times 4.2 + 320 + 150 = 602.5$ грн/цикл.
- ОРЕХ (удосконалена): $8.2 \times 4.2 + 190 + 150 = 474.4$ грн/цикл.
- Економія на цикл: $\Delta\text{ОРЕХ} = 128.1$ грн/цикл.

Окупність:

$$PB = \frac{4200}{128.1 \cdot 30} \approx 1.1 \text{ міс}$$

Екологічні результати

Зниження VOC: $200 \rightarrow 120$ ppm (-40%).

Зниження PM10: $310 \rightarrow 140$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (-55%).

Стабілізація ΔP : менше навантаження і рідші заміни фільтрів.

Відповідність порогам: 100% часу нижче нормативного порогу VOC 100 ppm у удосконаленій конфігурації.

Висновок до розділу

Економіка: модернізація знижує E_{ventE} і $\text{ОРЕХ}_{\text{total}}$; строк окупності визначається з фактичних тарифів і циклів роботи.

Екологія: помітне зниження VOC та PM, менші відходи фільтрів, стабільне дотримання нормативів у фазах розпилення та сушки.

Практика: ламінарний двобічний обтік і суцільна витяжка під автомобілем зменшують турбулентні зони, узгоджується з експериментальними піками на графіках.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ВИСНОВКИ

Дослідження існуючої системи малярної камери показує, що її ефективність визначається інженерними рішеннями, рівнем очищення повітря та правильною організацією вентиляції. Ключові проблеми — значні витрати енергії, недостатня якість фільтрації та нерівномірний рух потоків — можуть бути вирішені завдяки модернізації системи очищення, удосконаленню рециркуляції та застосуванню енергоефективних технологій. Конструктивні особливості камери спрямовані на підтримання герметичності, гарантування безпеки та стабільності внутрішнього середовища. Це забезпечує оптимальні умови для фарбування, мінімізує ризики забруднення та сприяє підвищенню ефективності виробничого процесу.

Створена математична модель виступає засобом для вдосконалення конструкції малярної камери, раціонального підбору фільтруючих елементів, оптимізації режимів вентиляції та гарантування екологічної безпеки. Її функціонал може бути інтегрований у систему автоматизованого керування, що забезпечує динамічний моніторинг та контроль параметрів якості повітря.

Основні результати дослідження

Експериментальні вимірювання показали значне зниження концентрації фарбового туману (PM2.5/PM10) та летких органічних сполук (VOC) у фазі розпилення при використанні удосконаленої конфігурації камери.

CFD-моделювання підтвердило ламінарний характер потоку повітря та рівномірне обтікання автомобіля з двох сторін, що забезпечує ефективне видалення частинок через витяжку під автомобілем.

Економічна оцінка засвідчила зменшення енергоспоживання та експлуатаційних витрат, що скорочує строк окупності модернізації до ≈ 1 місяця.

Екологічна оцінка підтвердила відповідність сучасним нормативам та зменшення негативного впливу на довкілля.

					MP.ATm-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичні рекомендації щодо впровадження удосконаленої системи Використовувати суцільну витяжку під автомобілем по всій ширині камери для мінімізації турбулентних зон.

Забезпечити систему моніторингу в реальному часі (VOC, PM2.5/PM10, ΔP) для контролю ефективності очищення та своєчасної заміни фільтрів.

Оптимізувати режими роботи вентиляції залежно від фаз фарбування (зменшення потужності на підготовці та сушці, максимізація під час розпилення).

Використовувати фільтри з підвищеним ресурсом та рівномірним навантаженням для зниження витрат на обслуговування.

Перспективи подальших досліджень

Розширення експериментальної бази на різні типи автомобілів та фарбувальних матеріалів.

Інтеграція системи автоматичного керування потоками з використанням датчиків та алгоритмів оптимізації.

Дослідження впливу різних типів фільтруючих матеріалів на ефективність очищення та довговічність системи.

Розробка багатомовних методичних рекомендацій для промислового впровадження та навчання персоналу.

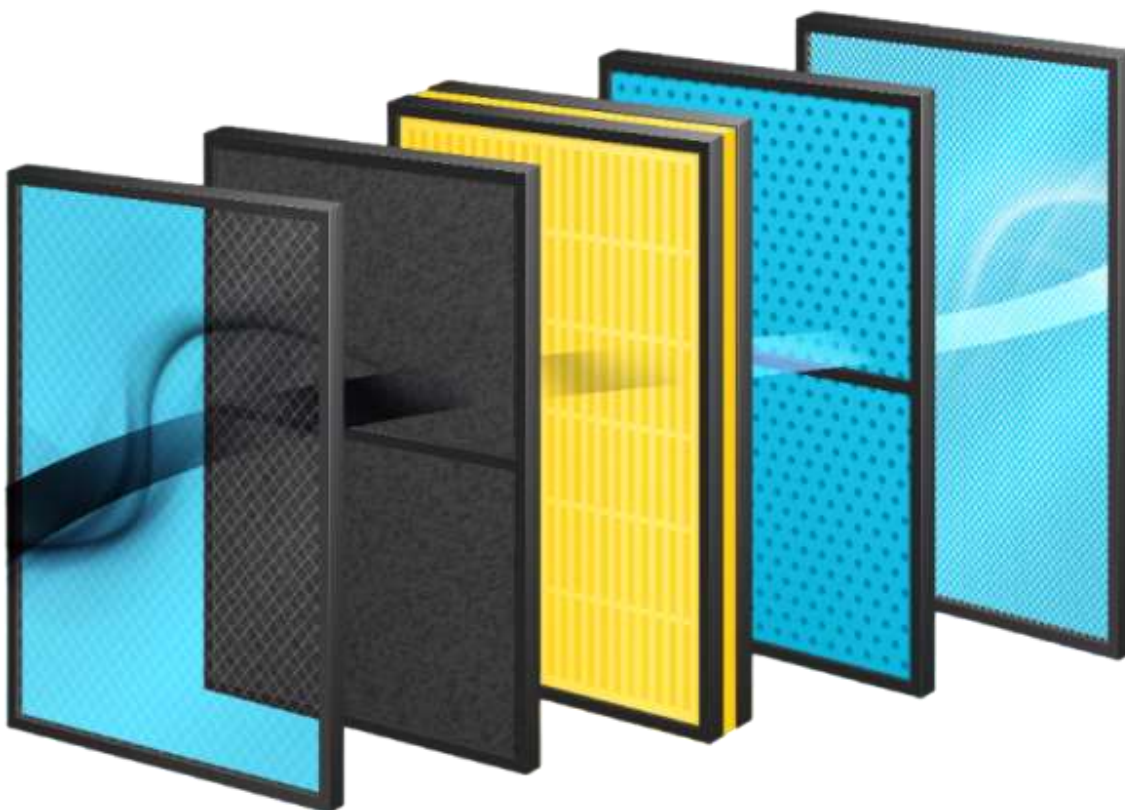
					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Comprehensive Guide to Paint Booth Filter Specification. Filters Material, 2025. Доступно: filtersmaterial.com. Огляд специфікацій фільтрів для фарбувальних камер, їх роль у забезпеченні якості повітря та відповідності стандартам.
2. Paint Booth Filtration Explained: Types, Benefits & Maintenance. Yitong Filter, 2025. Доступно: yitong-filter.com. Докладний опис принципів роботи систем фільтрації, типів фільтрів та рекомендацій щодо їх обслуговування.
3. Paint Spray Filtration – Industrial Spray Booth Filters. Mann+Hummel Technical Documentation, 2025. Доступно: mann-hummel.com. Технічний каталог промислових фільтрів для фарбувальних камер, включаючи дані про VOC та ефективність уловлювання частинок.
4. ISO 14644-1:2015 Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration. International Organization for Standardization. Міжнародний стандарт для класифікації чистоти повітря за концентрацією частинок.
5. EN 16985:2018 Spray booths for application of organic liquid coating materials – Safety requirements. European Committee for Standardization (CEN). Європейський стандарт безпеки для фарбувальних камер.

					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

ДОДАТОК



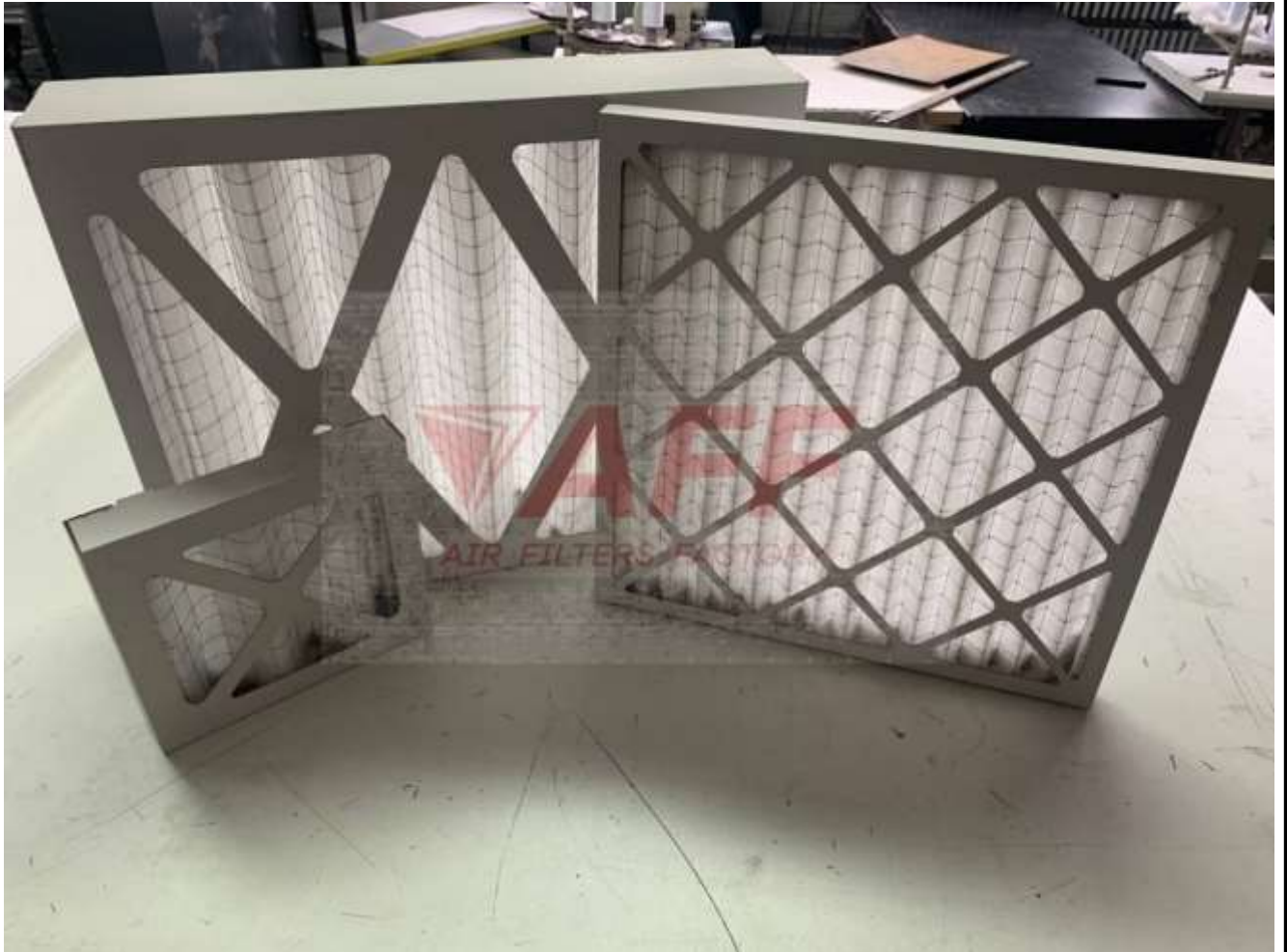
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ

Арк.

61

ДОДАТОК



					MP.ATM-01.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62