

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменджменту
Кафедра геоінженерії**

«На правах рукопису»

УДК 661.16.011:628.511/.512](043.3)

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

В.о. завідувача кафедри

_____ Наталя ЗУЄВСЬКА

« ____ » _____ 2025 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Екоєфективне повосенне відновлення забруднених територій»
спеціальності 183 «Технологій захисту навколишнього середовища»
на тему: «Удосконалення технології фасування пестицидів із
модернізацією пилогазоочисної системи»**

Виконав:

студент 2 курсу, групи ГТ-41мп

Новохатько Руслан Олександрович

Науковий керівник:

к.т.н., старший викладач

Ган Олена Валеріївна

Нормоконтроль

доцент к.т.н., доцент Ган Анатолій Леонідович

Рецензент:

головний інженер АТ Київський завод «РІАП» ,

Литвинко Григорій

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань. Студент

Київ – 2025 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет/ННІ: ННІ Енергозбереження та Енергоменджменту
Кафедра: Геоінженерія
Рівень вищої освіти: другий (магістерський)
Спеціальність: 183 Технологій захисту навколишнього середовища
Освітньо-професійна/ програма: Екоефективне повоєнне відновлення забруднених територій

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри
_____ Наталя ЗУЄВСЬКА
«__» _____ 2025р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Новохатько Руслан Олександрович**

1. Тема дисертації: **«Удосконалення технології фасування пестицидів із модернізацією пилогазоочисної системи»**

Науковий керівник дисертації: Ган Олена Валеріївна к.т.н., старший викладач
затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025р. № 4749-с.

2. Строк подання студентом дисертації «__» грудня 2025р.

Об'єкт дослідження – процес фасування пестицидів та очищення повітря у виробничих приміщеннях лінії фасування пестицидів.

Предмет дослідження – параметри викидів забруднюючих речовин під час технологічного процесу фасування пестицидів.

Для досягнення зазначеної мети поставлено та вирішено такі задачі дослідження:

1) проаналізувати джерела і склад забруднень повітря при фасуванні пестицидів існуючої системи очищення повітря на лінії фасування пестицидів АТ «Київський завод РІАП»;

2) обґрунтувати доцільність модернізації лінії фасування пестицидів;

3) удосконалити технологію фасування пестицидів та модернізувати систему очищення повітря;

4) розробити стартап-проект.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: ситуаційний план, конструкція модернізованої пилогазоочисної системи, схема розташування аспіраційної установки, плакати з результатами дослідження.

7. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	Ган А.Л.		

8. Дата видачі завдання: 28.10. 2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розділ 1 Теоретичні основи очищення повітря у хімічному виробництві		
2	Розділ 2 Аналіз існуючого стану очищення повітря на лінії фасування пестицидів		
3	Розділ 3 Розробка комплексного рішення для підвищення ефективності очищення повітря		
4	Розділ 4 Стартап-проект «Екоефективна система очищення повітря для хімічних виробництв»		

Студент _____ Руслан НОВОХАТЬКО

Науковий керівник _____ Олена ГАН

РЕФЕРАТ

Обсяг роботи: 136 сторінки, 14 рисунків, 42 таблиці, 75 джерел.
Тема: «Удосконалення технології фасування пестицидів із модернізацією пилогазоочисної системи».

Магістерська дисертація присвячена підвищенню ефективності очищення повітря на дільниці фасування пестицидів шляхом впровадження інтегрованої системи локального перехоплення, багатоступеневої фільтрації та моніторингу параметрів повітря.

Мета дослідження – удосконалення технології фасування пестицидів та модернізація пилогазоочисної системи на виробничій ділянці.

Об’єкт дослідження – процес фасування пестицидів та очищення повітря у виробничих приміщеннях лінії фасування пестицидів.

Предмет дослідження – параметри викидів забруднюючих речовин під час технологічного процесу фасування пестицидів.

Для досягнення зазначеної мети поставлено та вирішено такі задачі дослідження:

- 1) проаналізувати джерела і склад забруднень повітря при фасуванні пестицидів існуючої системи очищення повітря на лінії фасування пестицидів АТ «Київський завод РІАП»;
- 2) обґрунтувати доцільність модернізації лінії фасування пестицидів;
- 3) удосконалити технологію фасування пестицидів та модернізувати систему очищення повітря;
- 4) розробити стартап-проект.

Наукова новизна. На основі отриманих результатів комплексного дослідження повітря робочої зони на лінії фасування пестицидів встановлено залежність відношення сумарного показника фактичних концентрацій кожної шкідливої речовини у повітрі внаслідок очищення різними фільтраційними системами, яка свідчить про те, що найефективнішим в умовах ПрАТ

«Київський завод РІАП» є застосуванням трирівневої фільтрації «префільтр – НЕРА – сорбційний модуль».

Практичне значення полягає у зменшенні викидів у робочу зону й атмосферу, скороченні витрат сорбентів та енергії й зменшенні терміну окупності проєкту. Представлені дослідження доцільно використовувати для розробки рекомендацій з покращення умов праці на підприємствах хімічної промисловості, зокрема на підприємствах, що займаються пестицидами.

Ключові слова: пестициди, пилогазоочистка, леткі органічні сполуки, локальна вентиляція, моніторинг повітря, забруднення повітря, фільтри очищення, гранично допустимі концентрації, санітарно-гігієнічні норми, стає середовище, екологічна безпека.

ABSTRACT

Scope of the thesis: 136 pages, 14 figures, 42 tables, 75 references.

Topic: : *"Improvement of pesticide packaging technology with modernization of the dust and gas purification system"*.

The master's thesis is devoted to increasing the efficiency of air purification at the pesticide packaging site by implementing an integrated system of local interception, multi-stage filtration and monitoring of air parameters.

The purpose of the study is to improve the technology of pesticide packaging and modernization of the dust and gas purification system at the production site

The object of research is the process of packaging pesticides and air purification in the production facilities of the pesticide packaging line.

The subject of the study is the parameters of pollutant emissions during the technological process of packaging pesticides.

To achieve an effective goal, the following **research tasks** were set and solved:

- 1) to analyze the sources and composition of air pollution during pesticide packaging by the existing air purification system on the pesticide packaging line of JSC Kyiv Plant "RIAP";
- 2) to substantiate the feasibility of modernizing the pesticide packaging line;
- 3) to improve the pesticide packaging technology and modernize the air purification system;
- 4) to develop a startup project.

Scientific news. Based on the results of a comprehensive study of the working area of the air on the pesticide packaging line, the dependence of the ratio of the total indicator of the actual concentrations of each harmful substance in the air as a result of purification by effective filtration systems was established, which actually indicates that the most effective in the conditions of JSC Kyiv Plant "RIAP" is the use of a three-level filter "pre-filter - HEPA - sorption module".

The practical significance lies in reducing emissions into the working area and atmosphere, reducing costs for sorbents and energy carriers, as well as reducing the project payback period. The presented studies should be used to develop recommendations for improving working conditions at chemical industry enterprises, in particular at enterprises that use pesticides.

Keywords: pesticides, dust and gas purification, volatile organic compounds, local ventilation, air monitoring, air pollution, purification filters, maximum permissible concentrations, sanitary and hygienic standards, stable state of the environment, ecological safety.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НОРМАТИВНО -ПРАВОВИХ ВИМОГ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ ФАСУВАННЯ ПЕСТИЦИДІВ	15
1.1. Нормативно-правові вимоги до фасування пестицидів	15
1.2. Небезпечні фактори процесу фасування.	19
1.3. Технології фасування пестицидів та системи пилогазоочистки.	23
1.4. Патентно-аналітичний огляд вітчизняних і зарубіжних рішень.	33
Висновки до розділу 1.....	40
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НА ДІЛЯНЦІ ФАСУВАННЯ ПЕСТИЦИДІВ	41
2.1. Аналіз діяльності та технологічних процесів на ділянці фасування пестицидів ПрАТ «Київський завод РІАП»	41
2.2. Моніторинг та ідентифікація місць утворення забруднюючих речовин ..	45
2.3. Інструменти та методики вимірювань забруднюючих речовин.	49
2.4. Аналіз ефективності фільтрації та еколого-економічна оцінка ділянки фасування пестицидів.	57
2.5. Схема місць потенційного утворення пилу й летких органічних сполук у робочій зоні	63
Висновки до розділу 2.....	69
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФАСУВАННЯ ПЕСТИЦИДІВ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ПИЛОГАЗООЧИСНОЇ СИСТЕМИ	70
3.1. Концепція удосконалення ліній фасування пестицидів	70
3.2. Розрахунок та проєктування системи пилогазоочищення	75
3.3. Модернізація пилогазоочисної системи на ділянці фасування пестицидів АТ «РІАП».	85
3.4. Оцінка очікуваних результатів	89
Висновки до розділу 3.....	94

РОЗДІЛ 4. СТАРТАП –ПРОЄКТ «RIAP CleanPack»	95
4.1. Інноваційна ідея та ринок застосування.	95
4.2. Аналіз ринку і конкурентного середовища.	101
4.3. Ресурсозабезпечення і дорожня карта впровадження.	106
4.4. Бізнес- та фінансова модель проєкту з оцінки ризиків та ефективності впровадження	110
Висновки до розділу 4.	119
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	120
АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	126

ВСТУП

Магістерська робота присвячена підвищенню рівня промислової безпеки та екологічної керованості на дільниці фасування пестицидів АТ «Київський завод РІАП» шляхом проектування та впровадження інтегрованої системи локального перехоплення забруднень і пилогазоочистки з керуванням за гігієнічними індикаторами. На відміну від традиційного підходу «більше витяжки – менше ризику», у роботі обґрунтовується джерелозорієнтована архітектура: герметизація технологічних вузлів, стандартизовані локальні укриття, розділення мережі на «пилову» та «газову» гілки, каскадна фільтрація «префільтр – НЕРА – сорбційний модуль», моніторинг ЛОС/РМ і перепадів тиску з алгоритмами дій. Виробничою базою дослідження є реальна лінія фасування АТ «РІАП», що забезпечує практичну валідацію методики та результатів у промислових умовах.

Актуальність дослідження. Фасування пестицидів належить до процесів підвищеного ризику через поєднання дрібнодисперсних твердих фракцій, летких органічних сполук і пікових викидів під час операцій засипання, дозування, укупорювання й наливу. Сучасні регуляторні вимоги, корпоративні політики ESG і суспільні очікування щодо якості повітря в робочій зоні та на межі промайданчика зумовлюють перехід від «компонентного» до інтегрованого, даними керованого підходу. Для підприємств типу АТ «РІАП» це питання не лише комплаєнсу, а й операційної стійкості: відсутність піків у робзоні корелює зі зменшенням аварійних зупинок, передбачуваним ресурсом фільтроелементів, нижчими енерговитратами та кращою репутацією у стейкхолдерів. В умовах воєнних і післявоєнних обмежень особливо актуальними є рішення зі швидким монтажем, модульністю, прогнозованими витратами та короткою окупністю.

Об’єкт дослідження. Виробнича система фасування пестицидів на базі АТ «РІАП», включно з технологічними вузлами (засипання/дозування/укупорювання/налив), системами повітрообміну та

пилогазоочистки, організаційними процедурами експлуатації і технічного обслуговування.

Предмет дослідження. Процеси утворення, перехоплення, транспортування та видалення пилу і ЛОС у зоні фасування; параметри локальної витяжної вентиляції (швидкості захоплення, мінусовий тиск), аеродинамічні опори та ефективність фільтрації; інструменти моніторингу й керування за індикаторами якості повітря; інтегральні гігієнічні показники ($\Sigma(\text{Ci}/\text{ГДKi})$, перцентилі $\text{PM}/\text{ЛОС}$) та економіка життєвого циклу (ТСО, PP , NPV).

Мета дослідження. Науково обґрунтувати й практично реалізувати на ділянці АТ «РІАП» інтегроване рішення високого контейнменту для фасування пестицидів, яке забезпечує стаке зниження рівнів пилу та ЛОС у робочій зоні до цільових значень, підтверджену ефективність каскадної очистки повітря і керовані експлуатаційні витрати з коротким терміном окупності.

Завдання дослідження:

- 1) проаналізувати нормативно-правові вимоги України та ЄС/ISO до фасування пестицидів і пилогазоочистки та сформувані вимірні критерії приймання (цільові рівні $\Sigma(\text{Ci}/\text{ГДKi})$, P95 для $\text{PM}/\text{ЛОС}$, частка часу з мінусовим тиском);
- 2) ідентифікувати небезпечні фактори процесу (пил, ЛОС, формальдегід, NOx) та типові джерела пікових викидів по вузлах лінії;
- 3) систематизувати сучасні технології локальної вентиляції, герметизації і фільтрації (рукавні, HEPA/ULPA , сорбційні модулі, VIBO) та вимоги до моніторингу;
- 4) виконати патентно-аналітичний огляд рішень і зіставити їх з потребами АТ «РІАП»;
- 5) розробити програму вимірювань і моделювання, включно з точками відбору, періодичністю та QA/QC ;
- 6) розрахувати повітрообмін, гідравлічні опори, підібрати фільтри/вентилятори/сенсори, сформувані принципові схеми ПГОС;

7) провести пілотні випробування/моделювання, оцінити «до/після» та досягнути $\Sigma(\text{Ci/ГДКі})$;

8) виконати еколого-гігієнічну, безпекову та еколого-економічну оцінку (TCO, PP, NPV), сформувані дорожню карту масштабування;

9) запропонувати бізнес-модель впровадження (канали, партнери, сервіси, SAaaS) і пакет пропозицій інвестору.

Якщо локалізувати джерела забруднення (герметизація + укриття), розділити мережі на «пилову» та «газову» гілки, застосувати каскад «префільтр – HEPA – сорбент» із безпечною заміною (VBO) та вбудувати моніторинг із керуванням за гігієнічними індикаторами, то на виробничій лінії фасування пестицидів можна стабільно досягти $\Sigma(\text{Ci/ГДКі}) \leq 0,30$ у штатних режимах, усунути пікові епізоди у робочій зоні, знизити енергоспоживання системи вентиляції і забезпечити окупність інвестицій < 3 років.

Методологія та методи дослідження. Використано поєднання інструментальних вимірювань (онлайн-датчики PM2.5/PM10, PID для ЛОС, точки upstream/downstream на фільтроступенях, диференційна манометрія ΔP , статичні тиски, анеометрія на крайках укриттів) та лабораторних аналізів (гравіметрія, хроматографія за потреби), стандартизованих процедур відбору (у т.ч. ізокінетика у каналах) та QA/QC (калібрування, бланки, дублікати). Розрахункова частина охоплює аеродинаміку мереж (лінійні та місцеві опори, балансування), підбір фільтрів за $ATC/\Delta P/\eta$, прогноз енергоспоживання за законами подібності вентиляторів ($Q \sim n$; $\Delta P \sim n^2$; $P \sim n^3$). Статистична обробка – описові характеристики, перцентильний аналіз, побудова індексу $\Sigma(\text{Ci/ГДКі})$ за змінами, побудова контрольних карт і виявлення піків із прив'язкою до подій процесу. Економічна частина – TCO, PP, NPV із сенситив-аналізом до тарифів, завантаження та цін на витратні матеріали. Верифікація – пілотні випробування на обраних вузлах лінії АТ «РІАП» з повним циклом «до/після».

Наукова новизна. На основі отриманих результатів комплексного дослідження повітря робочої зони на лінії фасування пестицидів встановлено залежність відношення сумарного показника фактичних концентрацій кожної

шкідливої речовини у повітрі внаслідок очищення різними фільтраційними системами, яка свідчить про те, що найефективнішим в умовах ПрАТ «Київський завод РІАП» є застосуванням трирівневої фільтрації «префільтр – НЕРА – сорбційний модуль».

Практичне значення полягає у зменшенні викидів у робочу зону й атмосферу, скороченні витрат сорбентів та енергії й зменшенні терміну окупності проєкту. Представлені дослідження доцільно використовувати для розробки рекомендацій з покращення умов праці на підприємствах хімічної промисловості, зокрема на підприємствах, що займаються пестицидами.

Апробація результатів. Основні положення та результати дослідження будуть представлені оремим пунктів в магістерській.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг роботи – 136 сторінок, включно з 14 рисунками та 42 таблицями, 75 джерел.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АТ – акціонерне товариство
- АТ «РІАП» – АТ «Київський завод РІАП»
- ОП – охорона праці
- ЗІЗ – засоби індивідуального захисту
- ГДК – гранично допустима концентрація
- $\Sigma(\text{Ci}/\text{ГДКи})$ – індекс сумарної відносної концентрації домішок
- PM_{2.5}/PM₁₀ – твердодисперсний пил діаметром $\leq 2,5/\leq 10$ мкм
- ЛОС – леткі органічні сполуки (VOC)
- NO_x – оксиди азоту
- HEPA – високоефективна фільтрація повітря (High Efficiency Particulate Air)
- ULPA – ультрависокоефективна фільтрація (Ultra Low Penetration Air)
- BIBO – безпечна заміна фільтрів «мішок-всередину/назовні» (Bag-In/Bag-Out)
- LEV – локальна витяжна вентиляція (Local Exhaust Ventilation)
- VFD – частотний перетворювач (Variable Frequency Drive)
- ΔP – перепад тиску
- vcap – швидкість захоплення на крайці укриття
- ATC – повітряно-тканинне навантаження фільтра (Air-To-Cloth)
- SBV – безпилове стикування «метелик» (Split Butterfly Valve)
- SCADA – система диспетчерського керування та збору даних
- EMS – система енергоменеджменту/моніторингу (Energy Management System)
- HMI – операторська панель/людино-машинний інтерфейс
- KPI – ключові показники ефективності (Key Performance Indicators)
- TCO – повна вартість володіння (Total Cost of Ownership)
- PP – простий термін окупності (Payback Period)
- NPV – чиста приведена вартість (Net Present Value)

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НОРМАТИВНО - ПРАВОВИХ ВИМОГ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ ФАСУВАННЯ ПЕСТИЦИДІВ

1.1. Нормативно-правові вимоги до фасування пестицидів

Фасування пестицидів належить до робіт підвищеної небезпеки, а отже технологічний процес, вентиляційні системи та пилогазоочистка мають відповідати одночасно вимогам хімічного законодавства, охорони праці, санітарного законодавства, екологічного регулювання та стандартів менеджменту. На рівні України ключовою передумовою є правомірне звернення з пестицидами, що охоплює державну реєстрацію діючих речовин і препаратів, наявність паспорта безпеки, інструкцій виробника, а також вимог до зберігання, маркування, транспортування та утилізації залишків і тари. На промисловому майданчику технологічна інструкція на фасувальній дільниці повинна фіксувати гігієнічні нормативи повітря робочої зони та процедури моніторингу, класи небезпеки речовин, перелік засобів індивідуального захисту і порядок дій у випадку аварій. Вентиляційні установки мають бути запроектовані й змонтовані відповідно до чинних будівельних норм з опалення, вентиляції та кондиціонування, із забезпеченням необхідної кратності повітрообміну, мінусових тисків у «брудних» зонах та локальних витяжних пристроїв безпосередньо біля джерел виділень. Стан фільтроелементів контролюють за перепадом тиску і регламентом заміни, а герметичність повітропроводів і вузлів перевіряють періодично випробуваннями. [1]

Регламент охорони праці вимагає виконання оцінки професійних ризиків для всіх операцій фасування, атестації робочих місць та медоглядів персоналу, що контактує з пестицидами, а також ведення журналів видачі ЗІЗ, навчання і інструктажів. Екологічні вимоги націлені на мінімізацію викидів забруднюючих речовин у повітря та на правильне поводження з небезпечними відходами: пилогазоочисні установки повинні забезпечувати нормативні концентрації на виході, а відпрацьовані фільтри та насичені сорбенти

збираються у відповідну тару як небезпечні відходи з подальшою передачею ліцензованим операторам. Для підприємства доцільною є інтеграція вимог у системи менеджменту відповідно до ISO 45001 (охорона праці) і ISO 14001 (екологічне управління), а також застосування принципів належної виробничої практики щодо чистоти, простежуваності та профілактики перехресного забруднення партій. На рівні ЄС обов'язковими орієнтирами є REACH (реєстрація, оцінка та обмеження хімічних речовин) і CLP (класифікація, маркування та пакування), які диктують структуру паспорта безпеки, піктограми небезпек і попереджувальні фрази на етикетках; для вибухонебезпечних середовищ від пилу або парів органічних розчинників застосовують вимоги АТЕХ щодо вибору обладнання, електроустановок, заземлення та контролю джерел запалювання. До пилогазоочистки і фільтрів релевантні стандарти ISO 16890 (оцінювання ефективності фільтрів загальної вентиляції за фракціями PM), EN 1822 та ISO 29463 (класифікація й випробування HEPA/ULPA), ISO 14644 (вимоги до чистих зон, корисні для контрольованих ділень фасування), а для повітря робочої зони – підходи до оцінювання професійного впливу на основі гранично допустимих рівнів із застосуванням принципу сумарної дії сумішей [66].

Для летких органічних сполук і формальдегіду в практиці промислової гігієни широко використовують методики відбору проб на сорбційні трубки з подальшим лабораторним аналізом, що закріплюється у внутрішніх методичних інструкціях підприємства та відомчих рекомендаціях. Вимоги до маркування тари для фасованих пестицидів включають стійкість до хімічної дії, герметичність, наявність контрольних пломб і засобів ідентифікації партії, а на етикетці – дані про склад, небезпеки, способи нейтралізації проливів і контакти реагування у надзвичайних ситуаціях. У галузевій практиці рекомендовано проводити попередню категоризацію приміщень за рівнем небезпеки і встановлювати контрольні рівні забруднення повітря, нижчі за законодавчі гігієнічні нормативи, щоб забезпечити запас міцності процесів і вчасно виявляти тренди зростання концентрацій. Для АТ «Київський завод «РІАП»

доцільно формалізувати єдиний реєстр нормативних вимог і внутрішніх документів: технологічних карт фасування, паспортів пилогазоочистних установок, карт ризиків, інструкцій із очищення та утилізації сорбентів і фільтроелементів, протоколів щоквартального аудиту вентиляції. Окрему увагу варто звернути на вибір фільтраційної конфігурації під характер забруднень: механічні префільтри для захисту від крупнодисперсного пилу, високоефективні НЕРА для тонкодисперсного аерозолі і сорбційні вугільні модулі для ЛОС і запахів; класи та ефективність фільтрів фіксуються у паспорті, а приймально-здавальні випробування включають випробування на витіки. Вентиляційні системи повинні гарантувати локальні швидкості відсмоктування у зоні джерела, мінусовий баланс тиску у фасувальній камері відносно суміжних приміщень, контроль шуму і вібрацій, а також відсутність рециркуляції забрудненого повітря без доведеної безпеки після очистки. У рамках екологічного законодавства підприємство оформлює дозвільні документи на викиди і звітність щодо обсягів і видів утворюваних відходів; у проектах модернізації пилогазоочищення обов'язковими є розрахунки очікуваного зниження концентрацій на джерелі і в робочій зоні, підтверджені натурними вимірюваннями. Усі вимоги інтегруються в процедури внутрішнього аудиту, план-графік технічного обслуговування, програми навчання персоналу та аварійні плани реагування з практичними тренуваннями [2].

Таблиця 1.1 – Нормативний каркас для фасування пестицидів і пилогазоочистки

Блок вимог	Орієнтири/стандарти	Що вимагається на ділянці фасування
Хімічне законодавство	Реєстрація препарату; паспорт безпеки; CLP	Етикетка з піктограмами, Н/Р-фразами; інструкції; простежуваність
Охорона праці	Оцінка ризиків; ISO 45001	Атестація місць; навчання; ЗІЗ; медогляди; журнали
Гігієна повітря	ГДК/ОЕЛ; принцип сумарної дії	План вимірювань; контрольні рівні; коригувальні дії
Вентиляція	Будівельні норми; локальна витяжка	Мінусовий тиск; швидкість захоплення; відсутність рециркуляції
Фільтрація	ISO 16890; EN 1822/ISO 29463; ISO 14644	Підбір префільтр+HEPA+сорбент; випробування на витоки
Вибухозахист	ATEX (пил, ЛОС)	Заземлення, антистат; категоризація зон; контроль іскроутворень

Продовження таблиці 1.1

Екологія	Дозвіл на викиди; ISO 14001	Звітність; утилізація фільтрів/сорбентів; моніторинг ефективності
Маркування тари	Вимоги до упаковки CLP	Герметичність, пломби, ідентифікація партій
Аварійна готовність	Плани реагування; навчання	Сорбенти, бар'єри, комплекти першої допомоги; тренування

Джерело узагальнено автором на основі вимог законодавства



Рис. 1.1. – Нормативний каркас для фасування пестицидів

Джерело узагальнено автором на основі вимог законодавства

Таким чином, узагальнення нормативних вимог показує, що дільниця фасування пестицидів є об'єктом підвищеного ризику, який потребує комплексного виконання стандартів у сфері хімічної безпеки, промислової гігієни, вентиляції, фільтрації, вибухозахисту, охорони праці та екології. Виконання цих вимог у взаємозв'язку забезпечує безпечні умови праці, зниження концентрацій шкідливих речовин у повітрі, мінімізацію технологічних ризиків і відповідність чинному законодавству, створюючи підґрунтя для впровадження ефективної комплексної системи очищення повітря і підвищення рівня промислової безпеки на підприємстві.

1.2. Небезпечні фактори процесу фасування

Фасування пестицидів поєднує механічні операції з переміщенням, дозуванням і укупорюванням твердих і рідких форм, що генерують два домінантні типи забруднень – аерозольний пил активних речовин і допоміжних наповнювачів та пари/газоподібні леткі органічні сполуки з розчинників і стабілізаторів. Пил утворюється під час засипання в бункери, пересипання між живильниками, просіювання, дозування у тару та під час струшування й укупорювання, а також при обслуговуванні фільтрів і прибиранні. Ключовими факторами, що посилюють пиловиділення, є висока крихкість гранул, низька вологість, високі швидкості падіння матеріалу, турбулентність від пневмотранспорту, неправильні кути випускних лотків і відсутність стабільних локальних потоків відсмоктування. Для рідких препаративних форм небезпека зумовлюється випаровуванням розчинників, утворенням аерозолі на наливних головках і вторинними викидами під час миття обладнання. Обидва типи забруднень характерні сумішевою дією: одночасно присутні частинки різних розмірів і композицій та багатокомпонентні ЛОС, що потенційно мають синергічні або адитивні ефекти. В оцінюванні професійної експозиції застосовують принцип сумарної дії: сума відношень виміряних концентрацій до відповідних граничних рівнів для всіх компонентів суміші не повинна

перевищувати одиниці. Вплив на персонал здійснюється передусім інгаляційним шляхом, але вагомими є перкутанний і пероральний ризики через контамінацію поверхонь рук і робочого одягу; тому процедури гігієни, відокремлені санітарні зони та контроль чистоти поверхонь є не менш важливими, ніж вентиляційні рішення. Гострі ефекти для пилу включають подразнення слизових оболонок, кашель, бронхоспазм, а для ЛОС – головний біль, сонливість, порушення координації; хронічні ефекти варіюють від астми та дерматитів до сенсibiliзації та впливу на печінку і нервову систему залежно від токсикологічного профілю. Екологічні ризики полягають у вторинному виносі пилу за межі цеху, формуванні запахів, потраплянні забруднень у систему вентиляційних викидів і у відходоутворенні (насичені сорбенти, фільтрокасети, забруднені СІЗ, тарні відходи). З погляду промислової безпеки дрібнодисперсний органічний пил і пари ЛОС створюють ризик займання та вибуху; при певних концентраціях і наявності джерела запалювання утворюються вибухонебезпечні суміші, що диктує вимоги до заземлення, антистатичних матеріалів, іскробезпечного інструменту та інертизації в окремих зонах. [3]

Технічний контроль будується за ієрархією: усунення або заміна найбільш небезпечних речовин за можливості; інженерні рішення у вигляді повної або часткової герметизації вузлів, локальних укриттів і ковпаків, шторкових заслонок, оптимізованого дозування та гасіння швидкостей падіння продукту; створення стабільних зон відсмоктування із захопленням 0,2–0,5 м/с, підтриманням мінусового тиску, розділенням чистих/брудних потоків та попередженням реаерозолізації. Далі застосовують адміністративні заходи: регламент прибирання методом «вологого збирання/промислових пилососів» замість стисненого повітря; лімітування часу перебування у гарячих точках; чіткі маршрути руху тари; наряд-допуск на газонебезпечні/вибухонебезпечні роботи; дрес-код і контроль доннінгу/доффінгу ЗІЗ. Засоби індивідуального захисту підбирають за фільтрувальними класами для аерозолів (наприклад, FFP3 або еквівалент) і комбінованими картриджами для парів органічних

розчинників; рукавички та захисні окуляри/екрани, хімістійкі комбінезони та взуття із антистатичними властивостями є обов'язковими. Для моніторингу стану середовища використовують комбінацію періодичних лабораторних вимірювань і безперервних датчиків, що відстежують ЛОС, перепад тиску на фільтрах і локальні швидкості повітря; дані підключають до панелі контролю технолога з порогоми оповіщення. Ключовими показниками результативності системи є зменшення сумарного індексу впливу, відсутність перевищень граничних рівнів у робочій зоні, зниження скарг персоналу, стабільний перепад тиску в межах паспортних значень, а також зменшення витрат на сорбенти та фільтри за рахунок правильного підбору й режимів. В екологічному вимірі оцінюють концентрації на джерелі викиду після пилогазоочистки, кількість утворених небезпечних відходів і наявність запахів; при необхідності встановлюють додаткові сорбційні ступені чи біофільтрацію. Практика на подібних дільницях доводить, що впорядкування режимів локальної витяжки, герметизація і перехід на трирівневу фільтрацію дають найбільший внесок у зниження пилу та ЛОС, тоді як правильна організація прибирання і заміна стисненого повітря на аспірацію різко зменшують реаерозолізацію [4].

Таблиця 1.2 – Карта небезпечних факторів процесу фасування

Джерело/операція	Тип забруднення	Основні механізми виникнення	Потенційні наслідки	Ключові інженерні контролю
Засипання, пересипання	Пил, дрібний аерозоль	Вільне падіння, турбулентність, сухість	Подразнення, сенсibilізація, вибухопил	Бункер-укриття, ковпаки, шибери, LEV
Дозування у тару	Пил/аерозоль	Просипання, пилоутворення при зсіпі	Контамінація, перевищення ГДК	Герметизовані головки, локальні витяжки
Налив рідких форм	Пари ЛОС, аерозоль	Випаровування, бризки, кавитація	Наркотичний ефект, запахи, вибухонебез.	Закриті наливні системи, сорбційні модулі
Укупорювання, струшування	Пил, пари ЛОС	Витіснення повітря з тари	Локальні піки концентрацій	Місцеві витяжки, мінусовий тиск
Миття обладнання	Пари ЛОС	Нагрів, розчинення забруднень	Подразнення, ПДВ для викидів	Закриті мийні цикли, нейтралізація
Обслуговування фільтрів	Пил концентрований	Розгерметизація касет, заміна сорбентів	Гостра експозиція персоналу	Шафові системи, СІЗ, вакуум-зняття пилу
Прибирання	Реаерозолізація пилу	Стиснене повітря, сухе підмітання	Рециркуляція пилу	Вологе прибирання, промисл. пиłosоси

Джерело узагальнено автором на основі джерел [3,4,5]

Таблиця 1.3 – Матриця моніторингу та цільові індикатори безпеки

Показник/індикатор	Базове значення (до)	Цільове значення (після)	Метод/частота контролю
Σ відносних концентрацій (сума Сі/ГДКі)	>1,0	≤0,3	Лаб. вимірювання щоквартально
Частка часу з перевищеннями локальних рівнів	Часті піки	0 подій/місяць	Безперервні датчики ЛОС, журнали подій
Перепад тиску на НЕРА/сорбенті	Нестабільний	У паспортному діапазоні	Онлайн ΔР, перевірка щотижня
Питома витрата сорбенту/фільтра	Висока	-20...30%	Облік ТЕО, щомісячний аналіз
Скарги персоналу/медзвернення	Поодинокі/часті	0 підтверджених випадків	Журнал ОП, нагляд за здоров'ям
Запахи/скарги зовні	Є	Відсутні	Скринінг периметру, гаряча лінія якості

Джерело узагальнено автором на основі джерел [3,4,5]

Зазначені підходи дозволяють системно управляти ризиками: від правильного визначення нормативних вимог і проектування вентиляційно-фільтраційної інфраструктури до моніторингу та постійного вдосконалення. Для АТ «Київський завод «РІАП» це означає формування «замкненого циклу» безпеки: визначення небезпек → контроль конструкцією і режимами → підтвердження ефективності вимірюваннями → коригування і навчання → регулярний аудит і оновлення рішень за результатами даних [5].

1.3. Технології фасування пестицидів та системи пилогазоочистки

Технологічний ланцюг фасування пестицидів на сучасному підприємстві будується за принципом «закритого контуру» від приймання й підготовки препаративної форми до дозування у тару, укупорювання та маркування з одночасним відведенням і очищенням повітря від пилу та летких органічних сполук. Для твердих форм (порошків, гранулятів, змочуваних порошків) застосовують бункери-накопичувачі з вібро- або гвинтовими живильниками, інколи з псевдозрідженням для стабілізації подачі; дозування реалізують рисочними, шнековими або ваговими дозаторами з корекцією по зворотному

зв'язку. Для рідких форм використовують насоси-дозатори з замкненими наливними головками, антибризковими вставками та відсмоктуванням під ковпаком. Критичні точки виділень – засипання, пересипання, дозування, укупування й миття – мають бути закриті укриттями або повністю інкапсульовані, щоб зменшити первинне утворення аерозолі й забезпечити направлений відсмоктувальний потік. Інженерна логіка така: насамперед мінімізувати генерацію, далі – перехопити на джерелі локальною вентиляцією, і лише потім очищати відведений повітряний потік у правильно підібраній фільтраційній системі. На практиці це означає, що конструкція дозаторів і наливних вузлів повинна бути з герметизованими з'єднаннями, з гофрованими гнучкими вставками, що компенсують вібрації, і з технологічними патрубками для підключення місцевої витяжки. Корпуси укриттів роблять з гладких матеріалів, що не накопичують пил і не електризуються, внутрішні кромки – із заокругленнями, а смотрові вікна – із хімістійких прозорих панелей; на високонебезпечних ділянках застосовують ізолятори з рукавичними портами. Для попередження перехресної контамінації потоки «чисте/брудне» розводять фізично й аеродинамічно: у фасувальній камері підтримують стабільний мінусовий тиск відносно суміжних приміщень, організують односторонній рух тари та персоналу, а припливне повітря подають у «чистіші» зони.

Локальна вентиляція проектується як сукупність укриттів, ковпаків, щілинних або бортових відсмоктувачів, що створюють на крайках укриття швидкість захоплення, достатню для перехоплення аерозолі до його змішування з повітрям приміщення. Для більшості фасувальних операцій орієнтовно приймають 0,2–0,5 м/с на крайці укриття, але геометрія і турбулентність визначаються експериментально димовими тестами та перевіряються анемометрами; на операціях з інтенсивним пиловиділенням швидкість збільшують і застосовують напівгерметичні кожухи. Ефективність LEV значно зростає при правильній організації припливу: підвід свіжого повітря формує ламінарні «штовхаючі» струмені, що допомагають нести аерозоль у ковпак, а не задувають його в зону дихання. Витяжні магістралі

розділяють на «пилові» та «газові» рукави з різними швидкісними режимами, щоб не допустити осадження пилу у трубопроводах і водночас не завищувати енергоспоживання. Гідравлічний опір мережі розраховують із запасом на забруднення фільтрів; на відгалуженнях ставлять балансувальні заслінки й вимірні ніпелі для сервісного контролю. Обов'язковим є відмова від рециркуляції відпрацьованого повітря у виробничу зону, якщо безпечність після очистки не підтверджена вимірюваннями та системою автоматичного блокування при аварійних концентраціях [6].

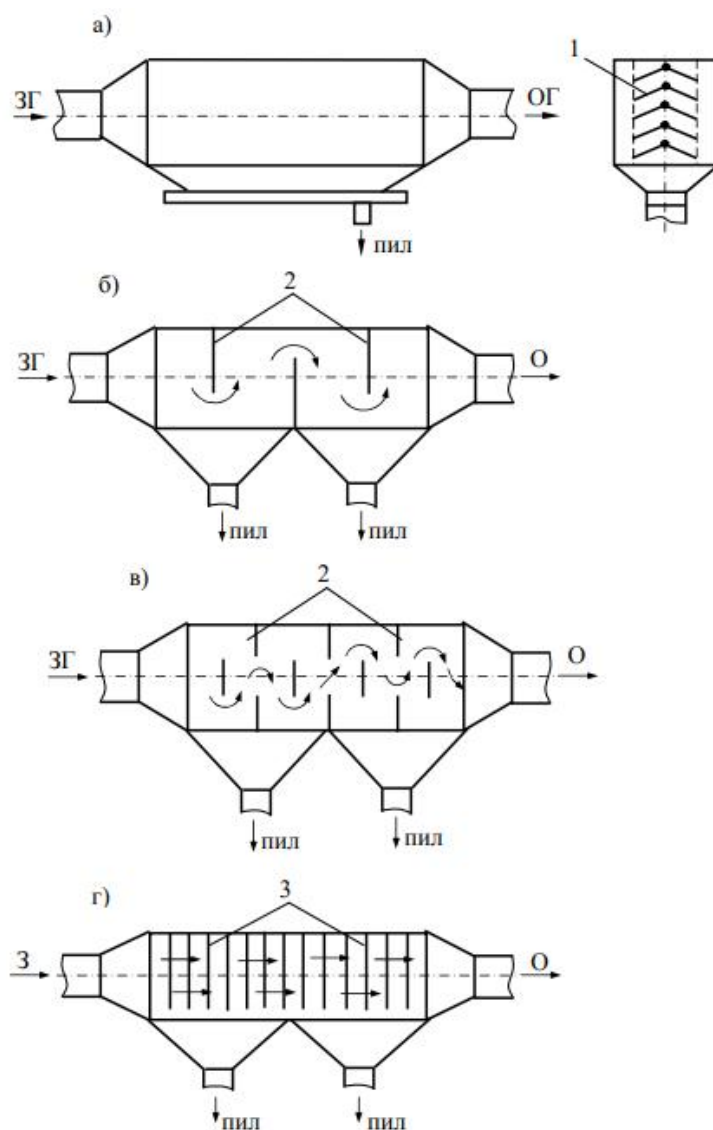


Рис. 1.2. – Огляд обладнання та методів очищення повітря: 1 – полиці; 2 – перегородки; 3 – ланцюгова або дротяна завіса.

Джерело [6]

Герметизація технологічних вузлів є другим стовпом системи. Вона включає ущільнення фланцевих з'єднань і ревізійних кришок, використання прокладок із PTFE/EPDM, швидкокорозійних хомутів із рівномірним притиском, гнучких компенсаторів між вібруючими механізмами та нерухомими повітропроводами, а також герметичні проходи для валів і датчиків. У вузлах засипання порошків застосовують приймальні мішки-манжети, які щільно охоплюють горловину тари та мають інтегрований патрубок відсмоктування; у рідинних – наливні голівки з двоконтурними ущільненнями і відведенням парів під ковпак. Для нештатних ситуацій передбачають аварійні шибири й інерційні клапани, що запобігають зворотному потоку. Вибухозахист забезпечують антистатичними матеріалами, заземленням, відсутністю джерел іскри, а для фільтрів і бункерів – мембранами скидання тиску або системами гасіння, узгодженими з категорією пилу/ЛОС [6].

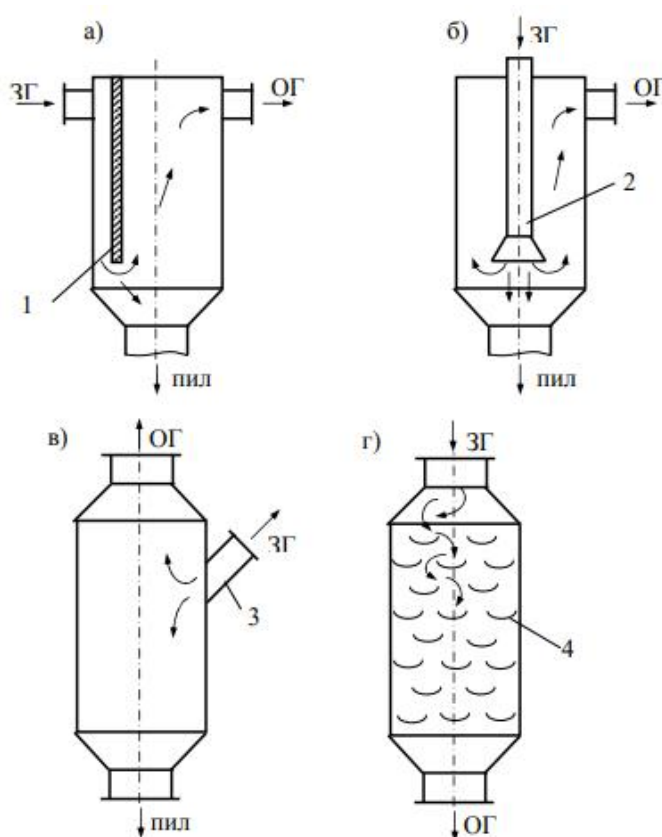


Рис. 1.3. – Типи пиловловлюючого обладнання: 1 – перегородка; 2 – центральна труба; 3 – боковий штуцер; 4 – горизонтальні елементи.
Джерело [6]

Фільтраційний каскад підбирають за природою домішок. Рукавні фільтри (baghouse) ефективні проти широкого спектру пилів і створюють на плівці осаду високий ступінь затримання; вибір тканини (поліестер, PPS, PTFE тощо) залежить від температури, хімічної агресивності та вологості. Ключовий параметр – повітряно-тканинне навантаження; для дрібнодисперсних токсичних пилів його знижують, а імпульсний обдув налаштовують так, щоб не руйнувати «торт» і не піднімати пил повторно. Важливо забезпечити рівномірний розподіл потоку по секціях і повну герметичність посадкових вузлів мішків; типові витоки у місцях обводу викликать локальні викиди після фільтра та «тремтіння» диференційного тиску. HEPA/ULPA фільтри застосовують для доволлювання тонкодисперсного аерозолі після рукавного ступеня або в локальних витяжних шафах, де неможливо використовувати великі baghouse. Класи H13–H14 і U15–U16 дозволяють досягти 99,95–99,9995% затримання на частинках $\sim 0,1\text{--}0,3$ мкм, але вимагають стабільно чистого попереднього повітря, інакше швидко забиваються. Для них критична якість ущільнення рамок та правильність монтажу: навіть мала «щілина» нівелює паспортну ефективність; тому приймально-здавальні випробування виконують аерозольним тестом із пошуком витоків по периметру. Сорбційні модулі, зазвичай на активованому вугіллі з імпрегнаціями, працюють проти ЛОС, альдегідів, кислотних/лугів; вони розраховуються за шлейфом прориву при заданих концентраціях, вологості й температурі. Висока вологість і змішаний склад можуть різко скорочувати ресурс сорбенту, тому бажана осушка та каскадування шарів із різними імпрегнаціями. Оптимально компонувати «префільтр механічний → рукавний або касетний високої пиломісткості → HEPA для аерозолі → сорбційний модуль для газів» з урахуванням допустимих перепадів тиску вентилятора, а у випадку тільки газового навантаження залишати механічний ступінь мінімальним [7].

Нижче узагальнено ключові порівняння технологій, що найчастіше застосовуються на фасувальних ділянках у табл.1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняння фільтраційних технологій

Технологія	Мішень забруднення	Типова ефективність	Переваги	Обмеження/ризики	Де застосовувати
Рукавний фільтр	Пил 0,3–100 мкм	Висока, після «торта»	Велика пиломісткість, ремонтпридатний.	Витоки в посадках; вибухопил; ΔP /енергія	Основні пилові магістралі
HEPA/ULPA	Тонкодисперсний аерозоль	Дуже висока (H13–U16)	Довговлуквання, компактність	Чутливість до попереднього пилу; витоки	Локальні укриття; «полірований» викид
Сорбційний модуль	ЛОС, альдегіди, кислоти/луж	Висока до прориву	Усунення запахів, цільові гази	Залежність від вологості, насичення	Після HEPA або на газових гілках
Касетний префільтр	Крупний пил >5–10 мкм	Середня	Захист наступних ступенів	Сам по собі недостатній	Перший ступінь у каскаді

Джерело автором на основі джерела [7]

Щоб локальна вентиляція дійсно «ловила» джерело, тип укриття має відповідати механіці процесу. Відкриті ковпаки придатні тільки там, де струмінь забруднення передбачуваний і повільний; при засипанні чи струшуванні потрібні щілинні відсмоктувачі у зоні контакту або повні кожухи. Укупорювання створює короткі піки витіснених газів і пилу; тут працюють кільцеві насадки-витяжки безпосередньо біля горловини. Для рідких форм застосовують закриті наливні головки із поверненням парів у витяжку. Оцінка ефективності виконується за допомогою димових проб, що візуалізують траєкторії, і перевіркою швидкостей на крайці укриття та в дихальній зоні оператора. Типові рекомендації узагальнені нижче [8].

Таблиця 1.5 – Рекомендовані конструкції LEV і швидкості захоплення

Операція	Конструкція укриття/LEV	Рекомендована швидкість на крайці	Примітки
Засипання/пересипання	Кожух із щільною витяжною	0,3–0,5 м/с	Додати «тихий» приплив для штовхання
Дозування порошку	Герметизована головка + бортова витяжка	0,3–0,4 м/с	Манжети на тарі, антистатичні матеріали
Укупорювання	Кільцева насадка-витяжка	0,2–0,3 м/с	Мінусовий тиск у камері
Налив рідких форм	Закрита голівка під ковпаком	0,2–0,3 м/с	Відведення парів у сорбційний ступінь
Ревізія/заміна фільтрів	Шафове укриття з фронтальним відсмокт.	0,3–0,5 м/с	Вакуум-зняття пилу, ЗІЗ високого класу

Джерело [8]

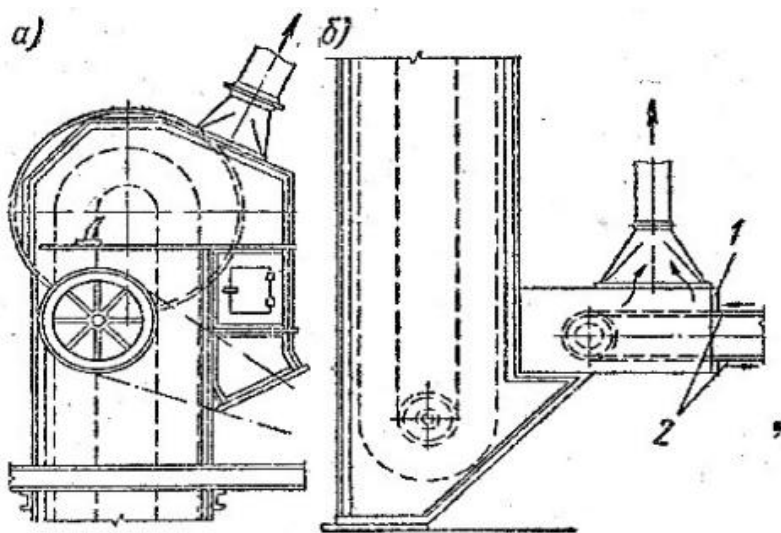


Рис. 1.4. – Схема аспірації елеватора (норії)

Джерело [8]

Система моніторингу – третя опора безпеки. Вона включає періодичні лабораторні вимірювання концентрацій у робочій зоні й на джерелі викиду, а також безперервні сенсори, що в режимі онлайн відстежують ЛОС, PM2.5/PM10, диференційний тиск на фільтрах, швидкості в повітропроводах і статичні тиски у камерах. На основі даних будується «панель здоров'я» дільниці з порогоми попередження та аварійного вимкнення; наприклад, перевищення встановленого контрольного рівня ЛОС вмикає інтенсифікований

відсмокт або блокує рециркуляцію, а вихід ΔP за паспортний діапазон ініціює службову заявку на заміну картриджів. Логування даних потрібне не тільки для комплаєнсу, а й для виявлення трендів – повільне зростання ΔP при незмінному навантаженні означає «замазування» фільтра й потребу в регламентній чистці або заміні, тоді як падіння ΔP при зниженні ефективності може свідчити про розриви або витоки. Для сорбційних модулів призначаються календарні інтервали контролю «точки прориву» на виході; при складних сумішах ЛОС доцільно ставити два шари з поетапною заміною, аби уникнути одночасного виведення з експлуатації всього кола. У зонах, де можливі вибухонебезпечні суміші, датчики повинні мати відповідний рівень вибухозахисту, а кабельні траси – бути рознесені та екрановані [9].

Щоб ув'язати технологію фасування з вентиляцією і фільтрацією саме під потреби діляниці, складають матрицю відповідності забруднень, режимів і конфігурацій. Для умов підприємства, що працює з порошковими й рідкими пестицидами, доречним є каскад префільтр → рукавний → HEPA → сорбційний на «пилових» рукавах і префільтр → HEPA → сорбційний на «газових» гілках локальних ковпаків. Критичною деталлю є простота сервісу: швидкознімні касети, фронтальний доступ, запилені зони винесені в окремі шафи з власним відсмоктуванням, щоб зменшити ризик гострої експозиції персоналу при ТО. У таблиці нижче узагальнено типовий підбір рішень.

Таблиця 1.6 – Матриця вибору конфігурації для фасування

Дільниця/операція	Профіль забруднень	Рекомендована конфігурація очистки	Ключові вузли герметизації	Моніторинг і тригери дій
Порошкове дозування	Пил PM10/PM2.5	Префільтр → Рукавний → НЕРА	Манжети тари, кожух дозатора	ΔР рукавного/НЕРА; РМ у дихзоні
Укупорювання порошків	Пил + сліди ЛОС	НЕРА локально → Сорбційний модуль	Кільцева насадка-втяжка	Піки РМ/ЛОС; мінусовий тиск
Налив рідких форм	Пари ЛОС, аерозоль	Префільтр → НЕРА → Сорбційний	Закрита наливна головка	ЛОС онлайн; ΔР сорбенту
Миття/сушіння	Пари ЛОС/водяна пара	Сорбційний + осушка	Закриті мийні контури	Граничні ЛОС у втяжці
Обслуговування фільтрів	Концентрований пил	Шафове укриття з окремою втяжкою → НЕРА	Швидкознімні касети, лотки збору	ΔР у нормі; частота замін; герметичність

Джерело [9]

Підтримуваність системи визначатиметься простотою експлуатації і наявністю чітких порогів. Тому розробляється регламент моніторингу з показниками, частотами і діями у випадку відхилень.

Таблиця 1.7 – План моніторингу та пороги втручання

Показник	Частота/метод	Поріг «попередження»	Дія	Поріг «аварія»	Дія
ΔP на рукавному фільтрі	Онлайн + щотиж. огляд	Вище паспортного на X%	Налаштувати обдув, перевірити витоки	Різкий стрибок/падіння	Зупинка секції, ревізія
ΔP на НЕРА/сорбенті	Онлайн + щотиж. огляд	Тренд зростання > Y%/міс	Планова заміна	Вихід за верхню межу	Негайна заміна/блокування гілки
ЛОС у робзоні	Безперервні датчики	> контрольного рівня	Підсилити витяг, провентилувати	> аварійного рівня	Евакуація, відключення джерела
PM2.5/PM10 у робзоні	Безперервні/періодичні	Піки вище цілі	Перевірити укриття/режими	Систематичні перевищення	Перебудова LEV, зупинка
Мінусовий тиск у камері	Постійний контроль тиску	Відхилення від цілі	Балансування заслінок	Втрата мінусу	Блокування операції

Джерело [9]

Комплексний підхід «технологія → LEV → фільтри → моніторинг» дає синергію: коли вузол дозування герметизований, локальна витяжка працює в режимі стабільного захоплення, а фільтри сприймають уже «приглушене» навантаження, ресурс сорбентів і НЕРА суттєво зростає, зменшується енергоспоживання, а коливання концентрацій у робочій зоні зникають. Водночас слід пам'ятати про експлуатаційні дрібниці, що вирішують усе: регулярне змащення ущільнень, перевірка притисків рамок НЕРА, облік маси відпрацьованих сорбентів і їх швидке виведення з цеху, навчання персоналу правилам «не здувати, а відсмоктувати», використання антистатичних інструментів і одягу, суворий контроль доннінгу/доффінгу ЗІЗ. Додатковим резервом покращення є цифровізація: підключення датчиків до SCADA/EMS із журналами трендів, дашбордами KPI ($\sum \sum C_i / \Gamma D K_i$, ΔP, питомі витрати енергії, витрата сорбенту), автоматичними заявками у сервіс при досягненні порогів і періодичними звітами для екологічної та охоронної служб. Для підприємства це трансформує пилогазоочистку з «чорної коробки» у прозорий керований

процес, де рішення приймаються на основі даних, а не лише за скаргами або випадковими перевітками [10].

1.4. Патентно-аналітичний огляд вітчизняних і зарубіжних рішень

Патентний ландшафт для діляниць фасування пестицидів формується на перетині трьох напрямів: висококонтейнментні технології поводження з порошками та рідинами, локальна вентиляція з герметизацією і вибухозахистом, а також багатоступенева пилогазоочистка з інтелектуальним моніторингом. У глобальних заявників домінують виробники обладнання для порошкової індустрії та «чистих» виробництв (системи ізоляції, split-butterfly valves для безпилового докування мішків і FIBC, станції розкривання мішків із інтегрованою аспірацією, ізолятори з рукавичними портами, безпечна заміна фільтрів типу bag-in/bag-out, каскади HEPA/ULPA і вугільних модулів, датчики витоків та DP-моніторинг). Значний масив патентів належить виробникам пилогазоочисного обладнання (рукавні фільтри з імпульсною регенерацією та оптимізаторами імпульсів, касетні фільтри високої пиломісткості, модулі HEPA з ущільненням ножового типу, сорбційні патрони з імпрегнованим вугіллям, багатосекційні адсорбери з «гарячою» регенерацією), а також виробникам вибухозахисту (мембрани й безполуменеві скидні панелі, системи активного гасіння, зворотні клапани для запобігання детонаційній хвилі). Окрема тематична група – патенти на VOC-очистку: адсорбція на активованому вугіллі, роторні концентратори на цеолітових колесах у сполученні з каталітичними чи регенеративними термічними окислювачами, УФ-фотоліз і низькотемпературна плазма; однак для пестицидних сумішей з галогеновмісними компонентами окиснювальні методи потребують ретельної перевірки утворення побічних токсичних продуктів, тому у практиці фасування переважають адсорбційні схеми з контрольованою заміною сорбенту. У вітчизняному секторі переважають корисні моделі на комбінації циклонів із рукавними фільтрами,

мокрих скрубєрів Вєнтурі для кислих/лужних газів, а також на модернізацію вузлів аспірації мішкорозкривних і дозувальних станцій. Бачимо тренд на здешевлення рішень за рахунок стандартизованих секцій та модульності, але з меншою увагою до висококонтейнментних вузлів і безпечної заміни фільтрів. Є низка українських заявок на системи безпилового стикування рукавів і на конструкції локальних укриттів з аеродинамічними «заслонами», однак промислова зрілість таких рішень нижча, ніж у глобальних лідєрів, і зазвичай потребує доведення на майданчику замовника.

З позиції потреб АТ «Київський завод «РІАП» релевантність патєнтних сімейств варто оцінювати через призму реальних джерел емісій – засипання/пересипання порошків, дозування у дрібну та середню тару, укупорювання, налив рідких форм, санітарні миття, а також обслуговування фільтрів і сорбєнтів. Для порошкових операцій найціннішим світовим стандартом є split-butterfly valve (SBV) або сумісні системи безпилового докування (buck-type), які забезпечують герметичне приєднання вкладиша FIBC або мішкового рукава до горловини приймального вузла з мінімальним виходом аерозолю; патєнтні матеріали описують геометрію заслінок, замикальні/інтерлок-механізми, антистатичні матеріали та алгоритми продувки інертним газом. Не менш корисні багатокамерні станції розкривання мішків із вбудованою щілинною витяжкою, шибєрами і вібро-ґратами; заявники детально опрацьовують аеродинаміку, що дозволяє утримувати стабільний фронт захоплення навіть при маніпуляціях оператора. На дозувальних головках перспективні патєнти пропонують гнучкі манжети з контролем притискного зусилля, змінні перехідники під різні типи тари та кільцеві витяжні насадки, що перехоплюють витіснене повітря під час укупорювання. Для рідких форм цінні патєнти на закриті наливні системи з поверненням парів на сорбційний модуль, антибризкові вставки, об'ємні або масові витратоміри в санітарному виконанні та безрозбірне миття [11].

У сегменті пилогазоочистки глобальні патєнти концентруються на оптимізації рукавних фільтрів: імпульсні клапани з адаптивною

тривалістю/тиском, зонне вмикання секцій, рівномірний розподіл потоку на вході через завихрювачі або перфоровані листи, фільтроматеріали з PTFE-мембраною, антистатичні та олеофобні обробки. Для HEPA/ULPA акцент – на безщілинних системах ущільнення, ВІВО-корпусах для безпечної заміни, вбудованих аерозольних тестах витоків і датчиках DP. У сорбційній частині патенти описують імпрегновані активовані вугілля, каскадування шарів, рознесені підбори гранулометрії для зменшення втрат тиску, рециркуляцію через сорбційні патрони з on-line контролем точки прориву. Участь у ландшафті мають і рішення з мокрих скрубєрів (особливо для аміаку, HCl, SO₂) з краплєвловлювачами, але до пестицидів вони чутливі через питання утворення небезпечних стоків; патенти зосереджені на відокремленні крапель і регенерації абсорбентів. Для VOC висока патентна активність у концентраторних системах (цеолітове колесо → RTO/катокиснювач), які знижують енерговитрати за рахунок підвищення концентрації органіки перед окисненням; для пестицидних сумішей такі схеми можливі лише після токсикологічної експертизи продуктів згоряння, тому для АТ «РІАП» базовою залишається адсорбція з регламентною заміною.

Вибухозахист займає важливе місце в патентах: мембрани і безполумєнєві панелі для рукавних фільтрів, зворотні клапани, швидкодіючі системи гасіння у фільтрокамерах, датчики тиску/полум'я і логіка відсікання. Для підприємства, де можливе утворення вибухонебезпечного пилоповітряного середовища або пароповітряних сумішей, такі рішення є умовою страхуваності ризиків і відповідності найкращим практикам [12].

Нижче узагальнено ключові патентні кластери й їх придатність до потреб дільниці фасування пестицидів.

Таблиця 1.8 – Патентні кластери та релевантність для АТ «РІАП»

Кластер рішень	Суть технічного принципу	Зрілість/TR L	Переваги для «РІАП»	Ризики/обмеження
SBV/безпилотне докування	Герметичне стикування тари/вкладиша	Висока	Радикальне зменшення пилу на засипанні	CAPEX; вимога сумісної тари
Ізолятори/локальні укриття	Інкапсуляція операції з рукавичними портами	Висока	Контроль джерела; мінусовий тиск	Ергономіка, сервісність
Мішкорозкривні станції з LEV	Щілинна/бортова витяжка, вібро-решета	Висока	Зручність, стабільний захват	Потребує правильного припливу
Рукавні фільтри з імпульсним обдувом	Регенерація осаду, антистатичні матеріали	Висока	Висока пилоємкість, ремонтпридатність	ΔP/енерговитрати; вибухозахист
HEPA/ULPA + BIVO	Довловлювання тонкого аерозолу, безпечна заміна	Висока	Компактність, відсутність перехресного пилу	Чутливість до попереднього ступеня
Сорбційні модулі (вугілля/імпрегн.)	Адсорбція VOC, альдегідів, кислот/луг	Висока	Усунення запахів, простота експлуатації	Ресурс залежить від вологості/суміші
Концентратори VOC + RTO/катокиснення	Цеолітове колесо + терм./кат. окиснення	Середня–вис.	Низькі OPEX при великих витратах газу	Ризик побічних продуктів для пестицидів
Мокрі скрубери Вентурі	Абсорбція розчинних газів, інерційне уловлення	Висока	Ефективні для NH ₃ /HCl/туманів	Утворення небезпечних стоків
Вибухозахист фільтрів	Мембрани, безполуменеві панелі, гасіння	Висока	Безпечність і відповідність страхуванню	Складність інтеграції/оглядів

Джерело [12]

Помітний пласт патентів присвячений «безпечній експлуатації»: вузли швидкої заміни фільтрів і сорбентів у герметичному кожусі (bag-in/bag-out), телеметрія ΔP та витрат, вибіркошукачі вбудованими фотометрами, а також алгоритми прогнозного сервісу за трендами. Ці рішення суттєво зменшують гостру експозицію персоналу при обслуговуванні й на пряму відповідають завданню зниження сумарного ризику. В українських заявках зустрічаються модулі сорбції зі змінними патронами без розгерметизації повітропроводу, але

їх промислова реалізація потребує уніфікації під стандартні картриджі та перевірки щільності замикання.

Для фасування пестицидів особливо цікаві патенти на контейнмент під час переходів «мішок → бункер → дозатор → тара». Світові лідери пропонують також continuous liner systems – «безперервні рукави», що дозволяють знімати заповнені пакети з пилом/відходом без контакту з оператором; для АТ «РІАП» це спосіб організувати чистий демонтаж фільтрів, очищення сит і збір відсіву. У рідинному контурі корисні закриті наливні головки з поверненням парів у сорбційний модуль, що фіксуються патентами на конструкцію ущільнень і алгоритми синхронізації з укупорюванням; вони мінімізують піки ЛОС.

Зведемо коротке порівняння висококонтейнментних рішень, які мають найбільшу віддачу для нашої ділянки.

Таблиця 1.9 – Висококонтейнментні рішення для порошкових операцій

Рішення	Зниження пилу	CAPEX/складність	Придатність до ретрофіту	Коментар щодо впровадження
SBV/безпилове докування	Дуже високе	Вищі	Середня–висока	Потрібна сумісна тара/вкладиш
Ізолятор із рукавичними портами	Дуже високе	Вищі	Середня	Мінусовий тиск, план ТО
Станція розкриття з LEV	Високе	Середні	Висока	Важливий правильний приплив
Кільцева витяжка на укупорюванні	Середнє–високе	Низькі	Висока	Локальне перехоплення піків
Continuous liner для відходів	Дуже високе	Середні	Висока	Безконтактне видалення відсіву/фільтрів

Джерело [12]

У частині VOC-очистки вибір між адсорбцією та тепловим/каталітичним окисненням залежить від номенклатури розчинників, концентрацій і теплотворності. Більшість патентів для фармацевтики/агрохімії зупиняються на адсорбційних касетах із імпрегнованим вугіллям, іноді з періодичною термодесорбцією у замикаючий цикл; для «РІАП» найраціональніше – змінні

патрони з плановою заміною за точкою прориву, оскільки це мінімізує ризики небажаної хімії. Узагальнимо порівняння [13].

Таблиця 1.10 – Варіанти VOC-очистки для ділянки фасування

Технологія	Цільові сполуки	Ефективність	Енерговитрати	Ризики/примітки	Доцільність для «РІАП»
Адсорбція (вугілля)	Широкий спектр ЛОС	Висока до прориву	Низькі–середні	Ресурс чутливий до вологості	Базовий вибір
Цеолітовий концентратор+RT O	Розчинники з високою	Дуже висока	Середні–високі	Побічні продукти згоряння можливі	Умовно, після токсик. оцінки
Каталітичне окиснення	Вуглеводні, спирти	Висока	Середні	Деактивація каталізатора	Обмежено, для стабільних потоків
УФ/плазма	ЛОС низьких конц.	Середня	Низькі–середні	Озон/альдегіди як побічні	Пілотні застосування

Джерело [13]

Аналіз вітчизняних заявок свідчить, що найтипівіші рішення для модернізації аспірації – перерозподіл повітропроводів із балансувальними заслінками, комбінування циклонів із рукавними секціями, локальні витяжні столи та ковпаки на дозувальних вузлах. Ці підходи дешевші і добре пасують для ретрофіту, але без SBV/ізоляторів ефект обмежений: джерело все одно генерує пил, який доводиться «переслідувати» вентиляцією. Тому найкраща стратегія для «РІАП» – об'єднати сильні сторони двох світів: застосувати вітчизняну модульність і ремонтпридатність у магістральній аспірації та рукавних фільтрах, але критичні вузли засипання/докування/укупорювання закрити висококонтейнментними вузлами SBV/ізоляторів, а фінішну очистку довірити HEPA+BIBO та сорбційним патронам із регламентом заміни.

Щоб перевести патентні ідеї у конкретний план модернізації, корисно сформулювати матрицю «виявлений розрив → патентний мотив → рекомендоване рішення → очікуваний ефект». Нижче наведений варіант такої матриці для умов підприємства [14].

Таблиця 1.11 – Порівняння поточних потреб «РІАП» з патентними мотивами та рекомендаціями

Виявлений розрив/потреба	Патентний мотив/кластер	Рекомендоване рішення для впровадження	Очікуваний ефект/метрика
Піки пилу при засипанні/пересипанні	SBV, мішкорозкривні з LEV	Встановити SBV на приймальні вузли FIBC	–70...90% пилу в зоні; падіння $\sum \sum C_i / \Gamma D K_i < 0,5$
Пил на укупорюванні тари	Кільцева витяжка, локальні ковпаки	Кільцеві насадки з –ΔP-контролем	Усунення піків; стабільний мінусовий тиск
Недовловлювання тонкого аерозолю	HEPA/ULPA з BIBO	HEPA H14 у BIBO-корпусах після рукавних	PM2.5/PM10 ↓ до фону; безпечна заміна
Запахи/ЛОС під час наливу/миття	Сорбційні патрони, повернення парів	Закриті наливні головки + вугілля імпрегн.	ЛОС ↓ до контрольних рівнів, запахи відсутні
Експозиція при заміні фільтрів	Безпечна заміна (bag-in/bag-out)	BIBO на HEPA і сорбентах; шафове ТО	0 контактів з пилом; зниження медзвернень
Ризик пилових вибухів	Мембрани/фламлес-панелі, зворотні	Безполуменеві панелі на рукавному, зворотні	Відповідність вибухозахисту, зниження збитків
Нестабільність режимів LEV	ΔP-моніторинг, балансування	Датчики ΔP/швидкостей, алгоритми тривоги	Стабільні швидкості, зниження OPEX

Джерело [14]

Загальна картина свідчить, що світові патентні портфелі зосереджені на підвищенні ступеня ізоляції джерела, ергономіці та безпечності сервісу, а також на даних і автоматизації – тобто на тому, що безпосередньо формує «замкнений контур» управління ризиками. Вітчизняні рішення покривають базову аспірацію і фільтрацію та дають перевагу у вартості та швидкості постачання, але потребують дооснащення висококонтейнментними вузлами й системним моніторингом, аби гарантувати стабільне досягнення суворих контрольних рівнів у повітрі робзони. Висновок для АТ «РІАП» простий: комбінована стратегія, що поєднує локальну інкапсуляцію джерел (SBV/ізолятори/закриті наливні вузли), каскадну фільтрацію (рукавний → HEPA/BIBO → сорбційний), вибухозахист фільтрокамер і цифровий моніторинг ΔP/ЛОС/PM із порогоми

втручання, максимально відповідає як патентним трендам, так і практичним вимогам ділянки фасування пестицидів. Це рішення не лише знижує $\Sigma \Sigma C_i / ГДК_i$ до цільових значень і прибирає піки, а й робить витрати передбачуваними через планову заміну картриджів і прогнозне обслуговування, що критично для безперервності виробництва та відповідності екологічним і гігієнічним нормам [15].

Висновки до розділу 1.

Нормативно-правові вимоги України та ЄС/ISO до фасування пестицидів і систем пилогазоочистки визначають чіткі гігієнічні орієнтири й процедури приймання рішень, які можна перевести в інженерні KPI: $\Sigma(C_i / ГДК_i)$ за зміну, перцентилі P95 для PM2.5/PM10 і ЛОС, стабільність мінусового тиску та підтверджена ефективність фільтрації за результатами вимірювань upstream/downstream. Аналіз небезпечних факторів показав, що критичні піки формуються під час засипання, дозування, укупорювання та наливу, коли одночасно присутні дрібнодисперсний пил, аерозолі й ЛОС; вплив на персонал і довкілля зменшується лише за умови джерелозорієнтованого перехоплення та безпечної експлуатації фільтроелементів. Огляд технологій підтвердив, що найкращий результат для таких ліній дає поєднання герметизації та локальних укриттів із розділенням мережі на «пилову» і «газову» гілки та каскадом «префільтр – НЕРА – сорбційний модуль», доповненим ВІВО-процедурами й моніторингом. Патентно-аналітичний огляд вітчизняних і зарубіжних рішень виявив відсутність повністю інтегрованих платформ під специфіку фасування пестицидів на зразок потреб АТ «РІАП», що обґрунтовує новизну та практичну цінність запропонованого підходу.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НА ДІЛЯНЦІ ФАСУВАННЯ ПЕСТИЦИДІВ

2.1. Аналіз діяльності та технологічних процесів на ділянці фасування пестицидів ПрАТ «Київський завод РІАП»

Виробнича ділянка фасування на АТ «Київський завод «РІАП» організована як послідовність технологічних зон, що забезпечують приймання препаративних форм, їх короткочасне буферне зберігання, підготовку (просіювання, дегазацію парів, гомогенізацію), дозування у споживчу чи транспортну тару, укупорювання, маркування, контроль якості і відвантаження. Для порошкових форм (пестициди у вигляді порошків, змочуваних порошків, гранулятів) основний матеріальний потік включає приймальний вузол (станція розкривання мішків або FIBC), бункер-накопичувач з вібро- або шнековим живильником, сито/просіювач із магнітною пасткою, ваговий або об'ємний дозатор, фасувальну головку з манжетним ущільненням, станцію укупорювання та етикетування. Для рідких форм передбачено ізольовані наливні головки, насосно-запірну арматуру із зворотним відведенням парів у витяжну гілку, вузол контролю масового витратоміра, а також мийно-дезінфекційний контур. [16]

Логіка розміщення обладнання підпорядкована розриву «чистих» і «брудних» потоків: таропідготовка, готова продукція і персональні маршрути відокремлені від зони з найбільш інтенсивними виділеннями пилу/ЛОС; у фасувальній камері підтримується мінусовий тиск відносно коридору і суміжних приміщень, а приплив організовано з «чистішої» частини зони у напрямку до локальних укриттів, щоб формувати спрямований перенос аерозолі в бік відсмоктувачів. Конструкція вузлів визначає природу і величину викидів: при розкриванні мішків і засипанні порошку у бункер домінує дрібнодисперсний пил (PM10/PM2.5), що виникає через вільне падіння та турбулентність; при дозуванні формуються просипи і вторинні підйоми пилу;

при укупорюванні відбувається витіснення повітря з тари, яке несе частки і сліди парів розчинників, якщо рецептура містить органічні розчинники; у наливі рідин джерелом є випаровування і аерозоль, що утворюється на поверхні струменя або при бризкоутворенні; у мийному контурі – пари ЛОС під час промивання та сушіння. Другим каналом є «скриті» дифузні витоки через нещільності люків, фланців, посадочних вузлів фільтрів та через неузгоджений приплив, який зриває «фронт» захоплення локальною вентиляцією. Третім каналом стає реаерозолізація при сухому прибиранні або продувці стисненим повітрям під час сервісу; тому режимні карти для прибиральних операцій прямо пов'язані з повітряним балансом дільниці.

З точки зору вентиляції дільниця має комбінований характер: локальна витяжка (LEV) кожухів і ковпаків на засипанні, над дозувальними головками, на укупорюванні і наливі; витяжні шафи/шафові модулі для сервісу фільтрів і сорбентів; магістральні «пилові» та «газові» повітропроводи з різними швидкісними режимами; загальнообмінний приплив із фільтрацією та вирівнюванням температурно-вологісних параметрів. На відгалуженнях встановлені балансувальні заслінки, вимірні ніпелі для перевірок, а на критичних гілках – датчики ΔP та витрати. Рециркуляція у виробничу зону не допускається без доведеної безпеки після очистки; викид після каскаду фільтрації подається на даховий дефлектор із достатньою швидкістю витікання. Каскад фільтрації організовано під домішки: механічний префільтр для захисту наступних ступенів, рукавний фільтр або касетна секція високої пиломісткості для масового пилу, НЕРА для доловлювання тонкого аерозолю і сорбційний модуль з активованим вугіллям (або імпрегнованим сорбентом) для ЛОС і запахів. При фасуванні лише сухих форм сорбційний ступінь може бути винесений тільки на локальні ковпаки укупорювання, тоді як для рідин – він обов'язковий на всій «газовій» гілці. Дільниця оснащена системою моніторингу: стаціонарні датчики ЛОС, рукавні фотометри/РМ-монітори в зоні дихання, тискоміри на фільтрах, анемометри на критичних перерізах, індикатори

статичного тиску в камерах; дані збираються у журнал трендів для аналізу дрейфів і своєчасного ТО.

Матеріальні потоки організовано так, щоб мінімізувати перехресну контамінацію: приймання та розкривання мішків – у передкамері зі щільною витяжкою; подача у виробничу камеру через шлюз із рукавним докуванням; тара входить окремим шлюзом; готова продукція виходить через шлюз контролю якості і маркування. Оператори працюють у визначених «стоянках» з ергономічним доступом до органів керування, а зона дихання розвернута відносно напрямку припливу, щоб запобігти перетинанню з потенційними «шлейфами». Прибирання організовано вологим способом і/або із застосуванням промислових пилососів із НЕРА, заборонена продувка стисненим повітрям; змінні фільтри та сорбенти знімаються в ВІВО-корпусах і герметично пакуються в безперервний рукав для подальшої передачі як небезпечні відходи [17].

Таблиця 2.1 – Перелік вузлів лінії фасування та характерні викиди

№	Вузол/зона	Функція	Потенційні домішки	Типові джерела викидів	Базові інженерні контролю
1	Станція розкривання мішків/FIBC	Приймання твердих форм	Пил PM10/PM2.5	Падіння, зсипи, турбулентність	Кожух + щільна LEV, SBV, антистат
2	Бункер-накопичувач + живильник	Буфер/дозова на подача	Пил, вторинні підйоми	Вібрації, неузгоджений приплив	Герметизація люків, бортова LEV
3	Сито/просіювач	Вилучення круп'яку	Пил дрібний	Просіювання, падіння часток	Кожух повний, розряд антистатисти
4	Дозатор ваговий/об'ємний	Дозування порошку	Пил, просипи	Зсип у тару, імпульсні потоки	Манжети тари, кільцева/бортова LEV
5	Наливна голівка (рідкі форми)	Дозування рідини	ЛОС, аерозоль	Випаровування, бризки	Закритий налив, відведення парів
6	Укупорювання/струшування	Закриття тари	Пил, ЛОС	Витіснення повітря з тари	Кільцева насадка-втяжка, мінусовий тиск
7	Маркування/контроль якості	Ідентифікація, перевірки	Мінімальні	Відбиття від суміжних зон	Фізичний розрив потоків
8	Шафове ТО фільтрів/сорбентів (BIVO)	Заміна касет, сервіс	Концентрований пил	Розгерметизація при знятті	Шафове укриття, локальна LEV, BIVO
9	Мийно-дезінфекційний контур	Промивання рідких трас	Пари ЛОС/водяна пара	Нагрів, дегазація	Закриті контури, сорбційний модуль
10	Загальнообмінна припливно-втяжна вентиляція	Баланс повітря, температури	—	Розрив фронту захоплення (за помилок)	Балансування, контроль стат. тиску

Джерело [17]

Таблиця 2.2 – Карта локальної вентиляції та цільових параметрів

Зона/операція	Тип LEV/укриття	Орієнтовна витрата, м³/год	Цільова швидкість захоплення	Коментар щодо інтеграції
Розкривання мішків/FIBC	Повний кожух + щільна витяжка	1200–1800	0,3–0,5 м/с	Додати «тихий» приплив назустріч ковпаку
Дозування порошку	Манжети тари + бортова витяжка	600–900	0,3–0,4 м/с	Антистат, уніфіковані перехідники
Укупорювання	Кільцева насадка-витяжка	300–500	0,2–0,3 м/с	Синхронізація з циклом укупорювання
Налив рідких форм	Закритий налив під ковпаком	500–800	0,2–0,3 м/с	Повернення парів у сорбційний ступінь
Шафове ТО фільтрів/сорбентів	Фронтальна витяжна шафа (VIVO)	700–1000	0,3–0,5 м/с	Вакуум-зняття пилу при демонтажі

Джерело [17]

Таким чином, діляниця фасування є складним джерелом пилу та летких органічних сполук, що формуються на різних етапах технологічного процесу. Сукупний вплив операцій, обладнання та властивостей пестицидів визначає багатофакторний характер забруднення повітря. Ефективне управління якістю повітря потребує поєднання локальної вентиляції, фільтрації, герметизації та постійного моніторингу відповідно до санітарно-гігієнічних норм та вимог екологічної безпеки.

2.2. Моніторинг та ідентифікація місць утворення забруднюючих речовин

Дизайн дослідження орієнтовано на кількісне підтвердження ефективності існуючих і модернізованих інженерних рішень у реальних виробничих умовах із урахуванням добових і змінних коливань, номенклатури препаратів і людського фактора. Заплановано поетапний підхід: етап «База» (до змін), етап «Пілот» (поетапне введення герметизації та LEV на окремих вузлах)

і етап «Після впровадження» (повномасштабний каскад фільтрації з налаштованим балансом повітря). На кожному етапі виконуються однотипні блоки вимірювань: стаціонарний моніторинг у робочій зоні, відбір проб у витяжних повітропроводах до і після кожного ступеня фільтрації, персональні профілі експозиції для операторів, а також контрольні вимірювання в санітарних зонах і на периметрі. Основним критерієм результативності приймається індекс сумарної дії суміші домішок у робочій зоні як сума відношень C_i/GDK_i з цільовим значенням $\leq 0,3$ у типових режимах і відсутністю піків, що виходять за контрольні рівні. Вторинні метрики – середні і 95-профілі $PM_{2.5}/PM_{10}$, інтегральні ЛОС (ppb або mg/m^3), стабільність перепаду тиску на рукавному/НЕРА/сорбенті, відсоток часу зі збереженням мінусового тиску в камері, а також операційні індикатори (частота скарг, інциденти, швидкість заміни картриджів).

Точки відбору обрані так, щоб репрезентувати «джерело → відсмоктувач → фільтрація → робзона → периметр». У робзоні визначаються мінімум три стаціонарні пости: у зоні дозування порошків (на висоті дихання оператора), у зоні укупорювання/маркування (для фіксації піків витіснення) і у зоні наливу рідких форм або в мийному контурі. У витяжних мережах – контрольні перерізи до рукавного фільтра, після нього, після НЕРА і на виході із сорбційного модуля; якщо пил і газу розділені, знімаються по кожній гілці. Персональні вимірювання включають носимі помпи з фільтрами для пилу та/або трубки для ЛОС на ключових ролях (оператор дозування, оператор укупорювання, сервісний інженер ТО). На периметрі діляниці встановлюють один контрольний датчик ЛОС для фіксації зовнішніх скарг на запахи; дані використовуються як індикатор нештатних режимів.

Часова організація передбачає повторення вимірювань у три послідовні зміни (ранкова, денна, вечірня), щонайменше у чотири дні для кожного етапу, щоб охопити варіативність партій і персоналу. Для кожної зміни в робзоні збираються безперервні ряди ЛОС і PM (1-сек або 1-хв дискрет), а також «хвилинні» записи статичних тисків і ΔP на фільтрах; відбір фільтрових проб

здійснюється двічі за зміну (на початку стабільного виробничого періоду і перед закінченням), персональні проби – повнозмінні. У вакуум-шафі ТО тестують «гіпотетично найгірший сценарій» під час навчальної заміни касет: перед і під час демонтажу реєструються РМ-піки, перевіряється ефективність локальної витяжки і герметичність пакетування відходів у безперервний рукав. Протокол якості (QA/QC) передбачає калібрування приладів, польові бланки, «порожні» та «збагачені» контрольні проби, дублікати в 10% вимірювань і трасування ланцюга зберігання. Дані інтегруються у єдину електронну форму з часом, кодами точок, серіями приладів, партіями продукції, метео параметрами приміщення і операційними подіями (зупинки, відкриття люків, прибирання) [18].

Таблиця 2.3 – Перелік точок відбору проб і моніторингу

Код точки	Опис/локалізація	Призначення	Параметри/метод
RZ-D	Робзона: дозування порошків (1,5 м від підлоги)	Інгаляційний фон оператора	PM2.5/PM10 (онлайн), ЛОС, точкові
RZ-U	Робзона: укупорювання/маркування	Піки витіснення	РМ піковий, ЛОС піковий
RZ-N	Робзона: налив/мийний контур	Пари ЛОС/аерозоль	ЛОС (онлайн), РМ, формальдегід*
D-BF	Витяжка до рукавного фільтра	Вхідна пилова навантага	Ізокінетичний відбір пилу
D-AF	Витяжка після рукавного фільтра	Ефективність рукавного	Ізокінетичний, ΔР
D-HEPA	Витяжка після HEPA	Довловлювання тонкої фракції	Аерозольний скан/РМ
D-VOC	Витяжка після сорбційного модуля	Точка прориву ЛОС	Трубки/онлайн ЛОС
PERIM	Периметр ділянки	Зовнішні запахи/скарги	Датчик ЛОС
TO-VIBO	Витяжна шафа ТО (VIBO)	Гострі піки під час замінів	РМ піковий, протоколи подій

Джерело [18]

Таблиця 2.4 – Періодичність і тривалість вимірювань

Параметр	Метод/обладнання	Тривалість/дискретність	Частота/етапи	Відповідальний
ЛОС (робзона)	Онлайн сенсори	1 с/1 хв	Безперервно, 3 зміни × ≥4 дні/етап	Інженер з ОП
PM2.5/PM10 (робзона)	Онлайн оптичні монітори	1 хв	Безперервно, 3 зміни × ≥4 дні/етап	Технолог дільниці
Пил у витяжці	Ізокінетичний відбір	60–90 хв на точку	2×/зміну, на всіх етапах	Лабораторія
НЕРА/сорбент ΔР	Датчики диференц. тиску	Хвилинні записи	Безперервно	Служба КВПіА
Мінусовий тиск	Манометри/передавачі	Хвилинні записи	Безперервно	Служба вентиляції
Персональні проби	Насос+фільтри/трубки	Повнозміна	1–2 особи/роль, у 2 дні/етап	Лабораторія
Формальдегід *	Сорбційні трубки + аналіз	30 хв на пробу	1×/зміну у RZ-N	Лабораторія

Джерело [18]

Аналіз даних проводиться у два кола. У першому – описова статистика (середні, медіани, 95-перцентилі), порівняння «до/після» за кожною точкою і параметром, побудова часових профілів та карт піків із прив'язкою до подій. У другому – узагальнення у вигляді інтегрального індексу $\Sigma(C_i/GDK_i)$ для робзони, розрахунок долі часу у «зеленій зоні» (нижче контрольних рівнів), оцінка впливу інтервенцій регресійними моделями з фіксацією коваріат (рецептура, зміна, температура/вологість). Для витяжних мереж обчислюється ефективність ступенів фільтрації та ресурс сорбенту за наближенням «точки прориву». Результати виносяться у щотижневі дайджести для технолога і у зведені місячні звіти для екологічної та охоронної служб із рекомендаціями: переналаштувати швидкість захоплення, замінити манжети, змінити графік ТО, відкоригувати маршрути персоналу, посилити контроль герметизації тощо. Такий дизайн дозволяє не лише зафіксувати досягнення нормативних цільових рівнів і стабілізувати процес, а й створює «петлю зворотного зв'язку», у якій дані

моніторингу безпосередньо керують експлуатаційними рішеннями дільниці фасування АТ «РІАП» [19].

2.3. Інструменти та методики вимірювань забруднюючих речовин

Методичний підхід до вимірювань побудовано на поєднанні безперервного онлайн-моніторингу в робочій зоні, періодичного інструментального відбору проб у витяжних повітропроводах до і після кожного ступеня фільтрації, а також персональних вимірювань експозиції для ключових ролей операторів. Для кожного класу домішок застосовано найбільш відтворювані та прийняті в промисловій гігієні методи з відомими межами виявлення, похибками та вимогами до калібрування. Вимірювання організовано так, щоб розрізняти фон у робочій зоні, пікові епізоди при операціях укупорювання/наливу та «масовий» склад потоку на фільтрацію, необхідний для оцінювання ефективності кожного ступеня системи пилогазоочистки. Для усіх каналів передбачено QA/QC-процедури: попередні та післявимірювальні нульові перевірки приладів, калібрування переносних насосів первинним калібратором витрати, ведення бланків ланцюга зберігання проб, бланкові та «збагачені» контрольні проби, дублікати щонайменше 10% вимірювань, а також перехресну валідацію онлайн-даних лабораторними результатами.

Для оксидів азоту використовується безперервний хемілюмінесцентний аналіз: озонатор генерує озон, який реагує з NO у вимірювальній камері з утворенням збудженого NO₂*, інтенсивність випромінювання якого пропорційна концентрації NO; для визначення NO₂ потік попередньо проходить через конвертор, що відновлює NO₂ до NO. Прилад реєструє NO, NO₂ і NO_x з дискретністю до 1 с; лінійність і чутливість перевіряються нульовим газом і стандартними концентраціями (пермеаційна трубка або балон зі зразовим газом). У витяжних гілках відбір проб на NO_x можливий або ізострумінно через пробовідбірну рамку з конверсією в аналізаторі, або через стаціонарні зонда-відбори, що забезпечують перемішування і температурну

стабільність. Для формальдегіду застосовується відбір повітря через картриджі з DNPH-сорбентом із подальшим розчиненням аддуктів і високоефективною рідинною хроматографією з УФ-детекцією на довжині хвилі близько 360 нм; такий підхід специфічний до карбонільних сполук і дає можливість одночасно визначати ацетальдегід і деякі інші альдегіди. У робочій зоні для оперативного індикаційного контролю дозволяється застосовувати колориметричні трубки на формальдегід, однак усі фінальні висновки базуються на HPLC-результатах. Для ЛОС в зоні персоналу та у ковпаках укупорювання використовуються фотоіонізаційні детектори (PID) із енергією лампи 10,6 еВ у безперервному режимі з 1-секундною дискретністю; прилад калібрується за ізобутиленом з коефіцієнтами пересчету під цільові суміші. Для ідентифікації та кількісного аналізу окремих компонентів ЛОС у витяжках відбираються проби на сорбційні трубки (Tenax TA, кокосове вугілля, багат шарові патрони) із подальшим термодесорбційним або екстракційним введенням у GC-MS/GC-FID. Витрати відбору і тривалість підбираються так, щоб забезпечити об'єм проби в діапазоні, достатньому для концентрацій, характерних для нашої ділянки, і не перевищити масу прориву сорбенту. Паралельно для контролю «точки прориву» сорбційних модулів у системі очищення ставиться онлайн-датчик ЛОС на виході фільтросорбера з порогами сповіщення [20].

Для пилу PM2.5/PM10 у робочій зоні застосовуються лазерні оптичні монітори з розділенням фракцій та 1-хвилинною дискретністю, що дозволяє фіксувати як короточасні піки, так і загальні профілі навантаження протягом зміни. У витяжних каналах застосовується ізокінетичний відбір на фільтри (PTFE або склопористі), з подальшим гравіметричним визначенням маси і, за потреби, мікроскопічним аналізом розмірного складу. Для перехресної валідації в робочій зоні протягом окремих змін паралельно встановлюються низьковитратні гравіметричні пробовідбірники PM2.5/PM10; це дозволяє скоригувати масштаб оптичних приладів за реальним пиловим аерозолем ділянки. Відбір фільтрових проб у витяжних мережах проводиться в контрольних перерізах до рукавного фільтра, після рукавного фільтра і після

НЕРА; отримані значення разом із виміряними витратами повітря забезпечують розрахунок ефективності кожного ступеня та дозволяють будувати матеріальні баланси пилу.

Перед початком кожного дня вимірювань проводиться повний цикл підготовки: візуальний огляд зонда і ліній відбору, перевірка відсутності конденсату, протікання та паразитних підсмоктувань, нульова перевірка газоаналізаторів, «dry-cal» калібрування витрат переносних насосів, перевірка реєстраторів тиску на фільтрах. Для PID виконується двоточкова калібрування (нульовий газ + еталон із відомою концентрацією ізобутилену), а подальша перерахункова шкала коригується за даними GC для типової суміші ЛОС дільниці. Статичні тиски в камері та на фільтрах логуються з хвилинною дискретністю для подальшого поєднання з профілями домішок; це потрібно, щоб відрізнити технологічні причини піків (наприклад, відкрита кришка або старт дозування) від аеродинамічних (втрата «мінуса» у камері або дисбаланс заслінок).

Важливим методичним елементом є узгодженість часу між усіма каналами: усі прилади синхронізуються за єдиним еталоном (годинник сервера), а журнали подій дільниці (початок/кінець партії, ТО, прибирання) ведуться з точністю до хвилини. Для персональних вимірювань насоси з фільтрами для пилу або з сорбційними трубками для ЛОС кріпляться в зоні дихання (комір) і працюють повнозмінно; в анкеті відмічається характер виконуваних операцій, використання ЗІЗ, переміщення між зонами. Для формальдегіду з DNPH у робзоні відбираються 30-хвилинні інтегральні проби у періоди очікувано найвищих концентрацій (налив/мийка), а у витяжних гілках – 60-хвилинні, узгоджені з фільтровими РМ-пробами, щоб забезпечити порівнянність по часу [21].



Рис. 2.1. – Алгоритм реагування на перевищення CL або $\Sigma(C_i/\text{ГДК}_i)$: послідовність дій VFD → перевірки укриттів → блок рециркуляції → тривога/тікети → безпечна зупинка.

Джерело [21]

Обробка даних починається з вхідного контролю якості: перевірка повноти записів, відкидання інтервалів розігріву приладів, очищення від очевидних артефактів (стрибки при калібруванні), оцінювання дрейфу нуля і лінійності по контрольним точкам. Для онлайн-рядів ЛОС і РМ

використовується попереднє згладжування ковзною медіаною з вікном 5 хвилин для виявлення структурних піків без втрати динаміки. Для кожного параметра будуються розподіли; як правило, ряди РМ і ЛОС мають логнормальний характер, тому поряд із середніми наводяться медіани та геометричні середні й стандартні відхилення. Нормальність перевіряється тестом Шапіро–Уїлка; при відхиленні від нормальності порівняння «до/після» виконуються непараметричними критеріями (Вілкоксона для парних вибірок, Манна–Уїтні для незалежних). Для NO_x, що часто ближчий до нормального розподілу при стабільних режимах, можливе застосування парного t-тесту; однак у присутності піків і «хвостів» рекомендується робити порівняння ще й за перцентилями (P50, P95) та індексом перевищення контрольних рівнів («частка часу вище CL»).

Розрахунок індексу сумарної дії виконується за формулою: індекс = сума по *i* компонентам відношень C_i поділених на ГДК_{*i*}, де C_i – середня або перцентильна концентрація кожного компонента за інтервалом оцінки, а ГДК_{*i*} – відповідний граничнодопустимий рівень для повітря робочої зони. Для ЛОС за відсутності повного розкладу по компонентах індекс оцінюється консервативно: інтегральна концентрація Т-VOC множиться на коефіцієнт консервативної токсичності, або ж береться ідентифікована частка пріоритетних компонентів з GC-аналізу та додається «залишок» із зниженим коефіцієнтом. Для формальдегіду індекс береться окремо, оскільки він має власний жорсткий норматив; для NO_x – диференціюється NO і NO₂, де в індекс входить саме NO₂. Для РМ у межах гігієнічної оцінки індекс може використовуватися як допоміжний (через відсутність універсальної ГДК для РМ у повітрі робзони для всіх галузей), однак для внутрішнього контролю встановлюються цільові контрольні рівні, що відповідають мінімізації ризиків (наприклад, зниження P95 до фонових значень після НЕРА) [22].

Для інтегрального порівняння ефективності інженерних заходів застосовується аналіз повторних вимірювань: якщо на одних і тих самих вузлах і в однакових технологічних режимах отримані ряди «до» та «після», будується

модель змішаних ефектів, де фіксовані фактори – «статус модернізації», «тип операції», «зміна», а випадкові – «день», «партія», «оператор». Це дозволяє відділити вплив модернізації від міжзмінної варіабельності. Ефект розмірності змін оцінюється через коефіцієнт d (Коена) для нормальних даних або δ (Кліффа) для непараметричних; на додачу будуються довірчі інтервали до відносного зниження середніх і перцентильних значень. Паралельно застосовуються контрольні карти Шухарта/EWMA для ΔP на фільтрах і для ЛОС у ключових точках: це інструмент оперативного виявлення дрейфів і своєчасного обслуговування, який зменшує ймовірність виходу на пікові події.

Облік невизначеності включає вклад порівнянності калібрувань, повторюваності (RPD дублікатів), впливу температури/вологості для оптичних РМ-моніторів, помилок перерахунку одиниць ($\text{ppb} \leftrightarrow \text{мг/м}^3$) та потенційної часткової втрати аналіту на стінках ліній. Для перерахунку газових концентрацій у мг/м^3 застосовується рівняння ідеального газу за фактичної температури/тиску приміщення; для лінійних перетворень ($\text{PID} \rightarrow \text{ізобутилен-еквівалент} \rightarrow \text{«еквівалент під суміш»}$) використовуються експериментально встановлені коефіцієнти з перехресної валідації з GC-аналізами. Обробка результатів нижче межі виявлення (LOD) виконується за правилом «LOD/2» для описової статистики, а для порівнянь застосовуються методи, стійкі до цензурування (наприклад, регресія Тобіта або непараметричні тести), щоб уникнути упередження в бік нуля. Викиди визначаються за критерієм Тьюкі (межі міжквартильного розмаху) для непараметричних даних або за критерієм Граббса для нормальних; однак відкидання допускається лише після звірки з журналом подій (наприклад, якщо зафіксовано відкривання ревізійного люка або позапланову продувку).

Узагальнена карта методів і умов відбору подана нижче; вона застосовується як внутрішній «паспорт методики» для дільниці, щоб усі заміри різними змінами та підрядниками були відтворюваними [23].

Таблиця 2.5 – Аналіти, методи, носії, режими відбору і межі виявлення

Параметр	Метод вимірювання	Носій/зонд/прилад	Типовий режим відбору	Межа виявлення / точність*
NO, NO ₂ , NO _x	Хемілюмінесценція (NO + O ₃ → NO ₂ *)	Газоаналізатор + конвертор	Безперервно, 1 с; ізострумінний	LOD ~ 1 ppb; точн. ±(1–2)% FS
Формальдегід	DNPH-картридж + HPLC-УФ	Картридж DNPH	30–60 хв, 0,8–1,2 л/хв	LOD ~ 0,5–1 мкг/проба; RSD ≤10%
T-VOC (онлайн)	PID 10,6 еВ	PID із логером	Безперервно, 1 с / 1 хв	LOD ~ 1–5 ppb ізобутилен екв.
VOC (склад)	GC-MS/GC-FID після сорбції	Трубки Тенах/вугілля	30–90 хв, 0,05–0,2 л/хв	До ppt–ppb залежно від компон.
PM _{2.5} /PM ₁₀ RZ	Лазерний оптичний монітор	ОПС, калібр. по гравіметрії	Безперервно, 1 хв	LOD ~ 1–5 мкг/м ³ ; точн. залежна
РМ у витяжці	Ізокінетика + гравіметрія	Зонд + фільтр PTFE	60–90 хв; у режимі каналу	RPD дублікатів ≤20%

Джерело [23]

Статистичний план аналізу структуровано відповідно до дослідницьких питань: 1) чи зменшили інженерні заходи середні/медіанні рівні домішок у робзоні; 2) чи зникли пікові епізоди під час критичних операцій; 3) наскільки зросла ефективність кожного ступеня фільтрації; 4) чи стабілізувалися аеродинамічні режими (ΔP , мінусовий тиск) і як це корелює з якістю повітря. Для цього сформовано набір метрик і тестів, який узагальнено у таблиці нижче; усі статистичні висновки супроводжуються довірчими інтервалами 95%, а для операційних метрик – контрольними картами.

Таблиця 2.6 – План статистичного аналізу і критерії інтерпретації

Питання/метрика	Опис і розрахунок	Тест/оцінка	Критерій успіху/інтерпретація
Зміна середніх/медіан ЛОС, РМ	Δ = після – до; також P50, P95	Вілкоксона / t-парний	Значуще зниження; 95% CI < 0
Піки під час укупорювання/наливу	Частота і тривалість подій вище CL	Порівняння пропорцій	↓ частки часу > CL до нуля
Ефективність рукавного, НЕРА, сорбенту	η = 1 – Спісля / Сдо	Довірчі інтервали η	η рукавн. $\geq$ 90%; НЕРА $\geq$ 99%; VOC-сорб $\geq$ 90%
Індекс Σ (Сі/ГДКі)	Сума фракцій по і; для T-VOC – консервативний підхід	Непар. тести/довірчі межі	$\Sigma \leq 0,30$ у типових режимах
ΔP і мінусовий тиск	Середні, SD, час у цільових межах	EWMA/Шухарт; тренд-аналіз	$\geq$ 95% часу в межах; відсутність дрейфів
Ефект розміру	d (Коена) або δ (Кліффа)	Оцінка ефекту	Суттєвий ефект:

Джерело [22,23]

Підсумовуючи методичну частину, запропонований набір інструментів і процедур забезпечує водночас оперативний контроль (онлайн-сенсори ЛОС і РМ, ΔP , статичні тиски) і доказову базу для прийняття інженерних рішень (DNPH-HPLC для формальдегіду, GC-аналіз ЛОС, ізокінетика для пилу в каналах, хемілюмінесценція для NOx). Стандартизовані точки і часові схеми відбору роблять дані порівнюваними між етапами «до/після» і між змінами; QA/QC-процедури захищають від систематичних помилок і дозволяють будувати довірчі інтервали для ключових KPI. Статистичний план орієнтований на практичну значущість: окрім «р-значень», наводяться розміри ефектів, перцентильні метрики і частки часу в контрольних межах, що безпосередньо прив'язано до експлуатації дільниці та охорони праці. У сукупності це створює прозорий контур «вимірювання → аналіз → рішення → валідація», який дає можливість не тільки досягти цільових рівнів якості повітря на дільниці фасування АТ «РІАП», а й підтримувати їх стабільно протягом усього життєвого циклу модернізованої системи пилогазоочистки [22].

2.4. Аналіз ефективності фільтрації та екологіко-економічна оцінка діяльності фасування пестицидів

Розрахункова частина побудована як послідовність взаємопов'язаних кроків: визначення потрібних витрат повітря для локального захоплення на кожному укритті/ковпаку; балансування повітрообміну ділянки з гарантованим «мінусовим» тиском у фасувальній камері; гідравлічний розрахунок мережі з підбором діаметрів і сумарних опорів; підбір вентилятора за витратою та повним тиском з урахуванням запасу і реальної ККД; підтвердження ефективності каскаду фільтрації за upstream/downstream-вимірюваннями; проектування сорбційного ступеня за допустимим часом до прориву; та, нарешті, ризик-орієнтована і еколого-економічна оцінка, яка переводить технічні рішення у показники $\Sigma(C_i/\Gamma D K_i)$, енергоспоживання, ТСО і термін окупності. Усі формули наведено в «робочому» інженерному форматі, прийнятному для впровадження на ділянці фасування АТ «РІАП».

Початкове визначення витрат повітря для локальної вентиляції виконується за правилом захоплення: $Q_h = v_{\text{сар}} \cdot A_h \cdot k$, де $v_{\text{сар}}$ – розрахункова швидкість захоплення на крайці укриття (типово 0,2–0,5 м/с залежно від інтенсивності процесу), A_h – ефективна площа отвору/щілини, k – коефіцієнт витрат/підсосу (1,2–1,8 для щілин, до 2,0 для відкритих ковпаків). Для одночасної роботи кількох укриттів застосовується коефіцієнт одночасності ϕ (0,6–0,9 за спостереженнями циклів дозування/укупорювання). Сумарна проектна витрата лінії: $Q_{\Sigma} = \phi \cdot \Sigma Q_{h,i}$. Далі визначається протитиск, необхідний для підтримання «мінусової» різниці в камері (десятки Паскалів у сталому режимі) – це досягається невеликим дисбалансом приплив/витяжка на користь витяжки з урахуванням фонових інфільтрацій. Для запобігання зриву фронту захоплення приплив організовують так, щоб формувати «штовхаючі» струмені назустріч ковпакам, не перехресшуючи з дихальною зоною оператора [23].

Далі виконується гідравлічний розрахунок мережі: вибирають швидкості у гілках (пилові 12–18 м/с, газові 8–12 м/с) для недопущення осадження часток

і економічної втрати тиску; за заданою витратою і швидкістю отримують розрахункову площу перерізу $A = Q/v$ та діаметр $D = \sqrt{(4A/\pi)}$. Лінійні втрати тиску у повітропроводах обчислюють за формулою $\Delta p_{\text{л}} = \lambda (L/D) \cdot (\rho v^2/2)$, де λ – коефіцієнт тертя (0,02–0,04 для сталевих каналів у турбулентному режимі), L – довжина ділянки, ρ – густина повітря ($\approx 1,2$ кг/м³ у робзоні), v – середня швидкість потоку. Місцеві опори на колінах, трійниках, перехідниках і дросель-заслінках підсумовують як $\Delta p_{\text{м}} = \sum \xi_i \cdot (\rho v^2/2)$, де ξ_i – коефіцієнти місцевих опорів за каталогами виробників/довідниками. Для кожної гілки отримують повний перепад $\Delta p_{\text{гілки}} = \Delta p_{\text{л}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{вузлів}}$ (вхід у ковпак, решітки тощо). Далі додають паспортні/проектні опори фільтроелементів (рукавний, НЕРА/ULPA, сорбент) і загальносистемні втрати (шумоглушник, дефлектор, перехід на вентилятор), формуючи сумарний опір Δp_{Σ} . Підбір вентилятора виконується за парою (Q_{Σ} ; Δp_{Σ}) з урахуванням реальної ККД вентилятора η_f і електропривода η_{el} ; розрахункова електрична потужність: $P_{el} = (Q_{\Sigma} \cdot \Delta p_{\Sigma}) / (\eta_f \cdot \eta_{el})$. Для компенсації старіння фільтроелементів і сезонних коливань густини вводять коефіцієнт запасу 1,1–1,25 на Δp_{Σ} і передбачають частотне керування (VFD) для регулювання продуктивності без зривів аеродинамічного режиму.

Для ілюстрації наведемо стислий числовий приклад для однієї лінії. Нехай у лінії три укриття: дозування порошку ($A_h=0,15$ м²; $v_{\text{ср}}=0,35$ м/с; $k=1,6 \rightarrow Q_1=0,084$ м³/с=302 м³/год), розкривання мішків ($A_h=0,25$ м²; $v_{\text{ср}}=0,45$ м/с; $k=1,5 \rightarrow Q_2=0,1688$ м³/с=608 м³/год) та кільцева насадка на укупорюванні ($A_h=0,08$ м²; $v_{\text{ср}}=0,25$ м/с; $k=1,4 \rightarrow Q_3=0,028$ м³/с=101 м³/год). Сумарно $Q=0,2808$ м³/с, з урахуванням $\varphi=0,8$ маємо $Q_{\Sigma} \approx 0,2246$ м³/с (≈ 809 м³/год). Для магістралі приймаємо $v=16$ м/с $\rightarrow A \approx 0,0140$ м² і $D \approx 0,134$ м (DN140); для ділянки $L=20$ м, $\lambda=0,03$ отримаємо $\Delta p_{\text{л}} \approx 0,03 \cdot (20/0,14) \cdot (1,2 \cdot 16^2/2) \approx 0,03 \cdot 142,9 \cdot 153,6 \approx 658$ Па. За $\sum \xi \approx 6$ маємо $\Delta p_{\text{м}} \approx 6 \cdot 153,6 \approx 922$ Па. Додаючи «найгіршу» гілку ($\approx 0,8$ кПа), рукавний (≈ 1200 Па), НЕРА (≈ 250 Па), сорбент (≈ 500 Па), інші втрати (≈ 300 Па), отримуємо Δp_{Σ} порядку 4,6 кПа; із запасом 15% $\rightarrow \sim 5,35$ кПа. Потужність:

$P_{el} \approx (0,2246 \cdot 5350) / (0,62 \cdot 0,9) \approx 2,15$ кВт; за 4000 мотогод/рік – 8,6 МВт·год/рік електроспоживання. Ця арифметика демонструє, що коректний вибір швидкостей і діаметрів дає керовані опори та адекватну енергетику, а VFD дозволяє тримати мінусовий тиск і швидкості захоплення у вузькому діапазоні без «перекачування» повітря [23].

Ефективність фільтрації для твердих часток визначається за класичною схемою «до/після»: $\eta_{PM} = 1 - (C_{out}/C_{in})$, де C – масова концентрація (або масова витрата при відомій витраті повітря). Для каскадів приймають послідовне перемноження залишкових часток: $\eta_{касаду} = 1 - \prod_j (C_{out,j}/C_{in,j})$. У практиці фасування пестицидів типова пара «рукавний → НЕРА» дає комбіновано 99,9% і вище для PM2.5/PM10, якщо upstream-навантаження й швидкість фільтрації (air-to-cloth) утримуються в розумних межах. Для рукавного ступеня корисно відслідковувати складові перепаду тиску: $\Delta p_{рук} = \Delta p_{fab} + \Delta p_{саке}$; надмірний імпульсний обдув може зменшити $\Delta p_{саке}$, але підняти постійну фракцію та збільшити винос пилу – це контролюється по трендах Δp і по залишкових концентраціях після ступеня. Для НЕРА критичною є відсутність байпасів – їх шукають аерозольним тестом; експлуатаційно правдоподібні опори H13–H14 у чистому стані – сотні Паскалів, а «кінець ресурсу» визначають за Δp та по зростанню РМ на виході.

Для ЛОС розрахунком керує сорбційний модуль. Мінімально потрібна маса сорбенту W визначається з балансу мас у межах допустимого часу до прориву $t_{пр}$ та цільового запасу: $W \geq (Q_{gas} \cdot C_{in} \cdot t_{пр}) / (C_{ар} \cdot sf)$, де Q_{gas} – витрата газу через модуль, C_{in} – вхідна масова концентрація ЛОС, $C_{ар}$ – питома сорбційна ємність (г ЛОС/г сорбенту) за робочих умов (температура/вологість), sf – коефіцієнт запасу (зазвичай 1,2–1,5 для сумішей). Наприклад, при $Q_{gas}=0,15$ м³/с, $C_{in}=40$ мг/м³, $C_{ар}=0,2$ г/г та $sf=1,25$, для $t_{пр} \approx 700$ год отримаємо $W \approx (0,15 \cdot 40 \cdot 700 \cdot 3600) / (1000 \cdot 0,2 \cdot 1,25) \approx (15,12 \cdot 10^6 \text{ мг}) / (250 \text{ г/кг}) \rightarrow$ у перерахунку ≈ 100 кг активованого вугілля з запасом. Практично точку прориву контролюють онлайнним PID на виході модуля з порогом попередження (наприклад, 10–20% від середнього upstream-рівня) і

аварійним порогом, що блокує рециркуляцію (якщо така передбачена) та запускає процедуру заміни картриджів. Гідравлічний опір шару сорбенту задається паспортними кривими або оцінюється за рівняннями типу Ергуна; при модернізації має сенс мінімізувати Δp сорбенту добором гранулометрії та секціонуванням шару (послідовні касети з різними імпрегнаціями) [24].

Ризик-орієнтована оцінка спирається на дві групи індикаторів: санітарно-гігієнічні та техніко-експлуатаційні. Перші зводять до інтегрального індексу $\Sigma(C_i/GDK_i)$ у робочій зоні (аналіз по змінах і перцентилях), частки часу вище контрольних рівнів (CL) для ЛОС/РМ, та показників піків у «гарячих» операціях (укупорювання, налив). Другі – це стабільність Δp на фільтроелементах, частка часу у цільовому діапазоні мінусового тиску, частота спрацювань тривоги та кількість сервісних втручань. Для пріоритезації інтервенцій формується матриця «ймовірність $\times$ наслідок» до/після: якщо після модернізації сценарії «гостра експозиція при ТО фільтрів» і «піки на укупорюванні» переходять із зон High/Medium у Low, це безпосередньо транслюється у зниження очікуваних втрат (менше простоїв, медзвернень, скарг). Фіналізація ризик-оцінки – це очікувана вартість ризику $ER = \Sigma p_j \cdot L_j$ (ймовірність $\times$ збиток) за рік; різниця $ER_{\text{до}} - ER_{\text{після}}$ є складовою «економії» у ТСО.

Фінансова модель повної вартості володіння (ТСО) включає CAPEX (укриття/ковпаки; повітроводи; вентилятор+VFD; рукавний фільтр; HEPA у ВІВО; сорбційний модуль; прилади моніторингу; монтаж/налагодження), OPEX (електроенергія; витратні матеріали – рукавні мішки/касети, HEPA-картриджі, сорбент; ТО і праця; витрати на видалення відходів; періодичні вимірювання), а також «ризик-скориговані» статті – уникнення штрафів/претензій, зменшення простоїв і бракованої продукції, медичні витрати. Розрахункові співвідношення: річні енерговитрати $Se = Pel[kW] \cdot h_{\text{рік}} \cdot \text{тариф}$; витрати на витратники – за регламентом заміни (HEPA/сорбент – у годинах або місяцях, рукави – у циклах/роках), waste – як маса $\times$ тариф на утилізацію. Економія $Sp_{\text{рік}} = (\text{витрати «до»} - \text{«після»}) + (ER_{\text{до}} - ER_{\text{після}}) + \text{інші непрямі вигоди (менше}$

браку/простоїв). Окупність $PP = CAPEX / Sp_{ik}$; $NPV = -CAPEX + \sum_t (Sp_{ik,t} - \Delta OPEX_t) / (1+r)^t$, де r – ставка дисконту, t – роки горизонту (зазвичай 5–7). Бажано проводити сенситив-аналіз по тарифу електроенергії, ціні сорбенту, годинній завантаженості та початковому Δp – це дає «коридори» окупності та дозволяє зафіксувати тригерні умови для експлуатації (наприклад, перехід на інший тип сорбенту при зростанні вологості/ЛОС) [75].

Щоб уніфікувати розрахунки по всіх вузлах, використовуємо табличні шаблони. Перший – для повітрообміну й опорів; він же виконує роль «паспортної карти» лінії при аудитах і сервісному обслуговуванні.

Таблиця 2.7 – Схема розрахунку повітрообміну та опорів (шаблон заповнення/приклад)

Вузол/гілка	Ah, м ²	vса, р, м/с	k	Qh, м ³ /год	vка, н, м/с	D, мм	L, м	λ	$\Sigma \xi$	Δp ф, Па	Δp м, Па	Інші втрати, Па	Δp гілки, Па
Розкривання мішків	0,25	0,45	1,5	608	16	140	12	0,03	3,5	395	538	50 (вхід)	983
Дозування порошку	0,15	0,35	1,6	302	14	90	10	0,03	3,0	470	353	50	873
Укупорювання (кільцева)	0,08	0,25	1,4	101	12	80	8	0,03	2,0	210	173	40	423
Магістраль	–	–	–	809*	16	140	20	0,03	6,0	658	922	100	1680
Рукавний фільтр	–	–	–	809	–	–	–	–	–	–	–	1200	1200
НЕРА (ВІВО)	–	–	–	809	–	–	–	–	–	–	–	250	250
Сорбційний модуль	–	–	–	540*	–	–	–	–	–	–	–	500	500
Інше (шумоглушник, дефлект)	–	–	–	809	–	–	–	–	–	–	–	300	300
Σ по системі													$\approx 5350^{**}$ *

Джерело [75]

*Q з урахуванням $\varphi=0,8$; **Газова гілка (ковпаки укупорювання/налив) може мати меншу витрату, наведено приклад; ***З урахуванням коефіцієнта запасу $\sim 15\%$. Значення в таблиці – ілюстративні.

Другий шаблон зводить ТСО і ризик-скориговані вигоди; його можна наповнювати фактами у процесі пілоту та перших місяців експлуатації, щоб отримати «живу» окупність.

Таблиця 2.8 – ТСО/окупність і ризик-скориговані вигоди (приклад розрахунку)

Стаття/метрика	«До» (грн/рік)	«Після» (грн/рік)	Економія/ефект (грн/рік)	Примітка/формула
Електроенергія	70 000	52 000	18 000	$P_{el} \cdot h \cdot \text{тариф}$
Рукавні мішки/касети	180 000	140 000	40 000	Ресурс за Δp та навантаження
НЕРА-картриджі	60 000	45 000	15 000	BIBO + чистіший upstream
Сорбент (актив. вугілля)	120 000	90 000	30 000	$t_{up} \uparrow$ завдяки умовам і каскаду
ТО і праця	100 000	70 000	30 000	Менше аварійних втручань
Простої/брак продукції	200 000	80 000	120 000	Піки/зриви режимів усунені
Видалення відходів (фільтри/сорбент)	60 000	50 000	10 000	Краще планування замін
Платежі за викиди/штрафи	50 000	5 000	45 000	$\Sigma(C_i/GDK_i) \leq 0,3$; стаб. CL
Медичні/скарги (опосередковано)	40 000	10 000	30 000	Зниження гострих експозицій (BIBO, LEV)
Σ Річний ефект $Sp_{ік}$			338 000	Сума економій
CAPEX (ковпаки+фільтри+VFD+монтаж)	–	–	900 000 (одноразово)	Орієнтир для лінії
Окупність $PP = CAPEX / Sp_{ік}$	–	–	$\approx 2,7$ року	$900\,000 / 338\,000$
NPV (7 років, $r=15\%$)	–	–	$\approx +505\,000$	$NPV = -CAPEX + Sp_{ік} \cdot (1 - (1+r)^{-7})/r$

Джерело [69].

*Примітка: значення – ілюстративні для масштабу однієї лінії; у фактичних розрахунках підставляються контрактні ціни, тарифи і виміряні годинні профілі [69].

З погляду експлуатаційної надійності доцільно закласти «петлю керування за даними»: Δp рукавного/НЕРА/сорбенту, онлайн-ЛОС у робзоні та на виході сорбційного модуля, статичні тиски в камерах – це «КРІ вентиляції», що прямо входять у формулу ТСО через енергію, ресурс фільтроелементів і ризику. Якщо у трендах видно повільний дрейф Δp або зростання ЛОС на виході сорбенту, алгоритм автоматично формує заявку на ТО до досягнення

аварійних порогів; так експлуатація переходить від «реактивної» до «прогнозованої», а вартість життєвого циклу зменшується без втрати безпеки.

На завершення підкреслимо принципи, що забезпечують стійкість розрахункових рішень. По-перше, «джерело понад усе»: усі дебіти й опори мають сенс лише за наявності реальної герметизації й укриттів, інакше будь-які Q перетворюються на «дорогу рециркуляцію пилу». По-друге, каскад фільтрації має бути збалансований: рукавний бере масу, НЕРА «полірує» тонкодисперсний хвіст, сорбент забирає газову фракцію; кожен ступінь працює у своєму оптимумі Δp та навантаження. По-третє, обов'язкова цифрова трасованість: Q , Δp , $\Sigma(C_i/GDK_i)$, P95 для ЛОС/РМ і частка часу в контрольних межах – це «живі» показники, що тримають у фокусі одночасно гігієну, енергоефективність і ресурс фільтроелементів. Така методика дозволяє АТ «РІАП» приймати інженерні рішення з прогнозованим ефектом: стабільний мінусовий тиск і швидкості захоплення, підтверджена ефективність очищення повітря, зниження інтегрального індексу впливу до цільових значень, прозора окупність модернізації та керована повна вартість володіння [67].

2.5. Схема місць потенційного утворення пилу й легких органічних сполук у робочій зоні

Узагальнена схема описує, як організовано рух матеріальних потоків і даних від моменту входу сировини у виробничу систему до прийняття інженерних рішень із модернізації та їхньої пост-валидації в експлуатації. Ідеологія проста: усі потенційні точки утворення пилу й легких органічних сполук повинні мати «парні» точки спостереження – у найближчій робочій зоні, у витяжному каналі до ступеня очистки і після відповідного ступеня, а також на «фініші» – у зоні викиду або на межі контрольованої території. Дані з усіх каналів синхронізуються з єдиною шкалою часу і зі станами технологічного обладнання (ввімкнення дозатора, цикл укупорювання, відкривання ревізійного люка, початок миття). Дослідження реалізує петлю «вимірювання → аналіз → рішення → впровадження → повторна перевірка» для трьох послідовних етапів:

«База» (до втручань), «Пілот» (локальні інтервенції на критичних вузлах) і «Після впровадження» (повномасштабна модернізація з балансуванням повітря). Щоб відтворити це у вигляді текстової блок-схеми, зручно представити загальну логіку як послідовність вузлів із розгалуженнями контролю: [Опис лінії та картографування джерел] → [Еталонні заміри в робзоні та у витяжках] → [Побудова матеріальних балансів РМ/ЛОС і аеродинамічного профілю] → [Гейт рішення DG-1: чи є перевищення контрольних рівнів/ $\Sigma(C_i/GDK_i) > 1$?] → якщо «так», то [Проект локальних інтервенцій: герметизація, укриття, налаштування LEV] ∨ [Пілотні випробування на одній-двох операціях] → [DG-2: чи зникли піки, чи стабілізувалися ΔP /тиски?] → якщо «так», [Розгортання каскаду фільтрації і моніторингу] → [DG-3: прийнятно-здавальні вимірювання «після»] → [Експлуатаційна панель КРІ і регламент ТО]. Якщо на будь-якому гейті відповідь «ні», запускається коригувальний цикл: перегляд параметрів укриттів, перерозподіл витрат повітря, зміна класу/формату фільтрів або сорбенту, а також уточнення порогів системи сповіщень. Важливо, що у схемі немає «сліпих зон»: кожен матеріальний перехід має і технологічну, і метрологічну візуалізацію – оператор бачить статус засувки і датчики швидкості/тиску, а інженер має графіки ЛОС/РМ та ΔP у розрізі часу і етапів процесу.

Текстове зображення блок-схеми, яке безпосередньо вкладається у рукопис, подамо у вигляді послідовності кроків з умовами і результатами. Крок 0: інвентаризація обладнання, трас і укриттів; знімання план-схеми ділянки з напрямками повітряних потоків і розміткою можливих «гарячих точок» (засипання, дозування, укупорювання, налив, мийка, ТО). Крок 1: первинний моніторинг – безперервні ЛОС/РМ у трьох робочих позиціях, ізокінетика пилу до і після рукавного ступеня, контроль ΔP на фільтрах і статичних тисків у камері; паралельно персональні повнозмінні проби для двох ключових ролей. Крок 2: аналітика «до» – описові статистики, перцентилі, індекс $\Sigma(C_i/GDK_i)$, карти піків із прив'язкою до подій, матеріальні баланси пилу і енергетичні профілі (PeI , витрати по вентиляції). Крок 3: проект інтервенцій – вибір типів

укриттів, розрахунок витрат і опорів гілок, підбір вентиляторів/фільтроелементів/сорбентів, модифікація трас (балансувальні заслінки, вимірні ніпелі), підготовка плану монтажу. Крок 4: пілот – локальна герметизація і LEV на 1–2 вузлах із повторними замірами; валідація швидкостей захоплення, мінусового тиску та падіння піків. Крок 5: розгортання повної конфігурації – рукавний ступінь, HEPA у ВІВО-корпусі, сорбційний модуль; запуск системи моніторингу ΔP /ЛОС/PM з порогами і автоматичним журналюванням подій. Крок 6: приймально-здавальні випробування – upstream/downstream-вимірювання ефективності, пошук витоків HEPA, тест точки прориву сорбенту, доведення балансів повітря до цільових профілів; фіналізована панель KPI та регламент ТО (у т.ч. сценарії аварійного реагування). Крок 7: циклічна експлуатаційна перевірка – щомісячні огляди, квартальні «повні» вимірювання, аналіз трендів, коригувальні дії і оновлення TCO/окупності. Усі кроки мають конкретні вхідні/вихідні артефакти: карти джерел, протоколи замірів, зведені таблиці KPI і звіти «до/після» [28].

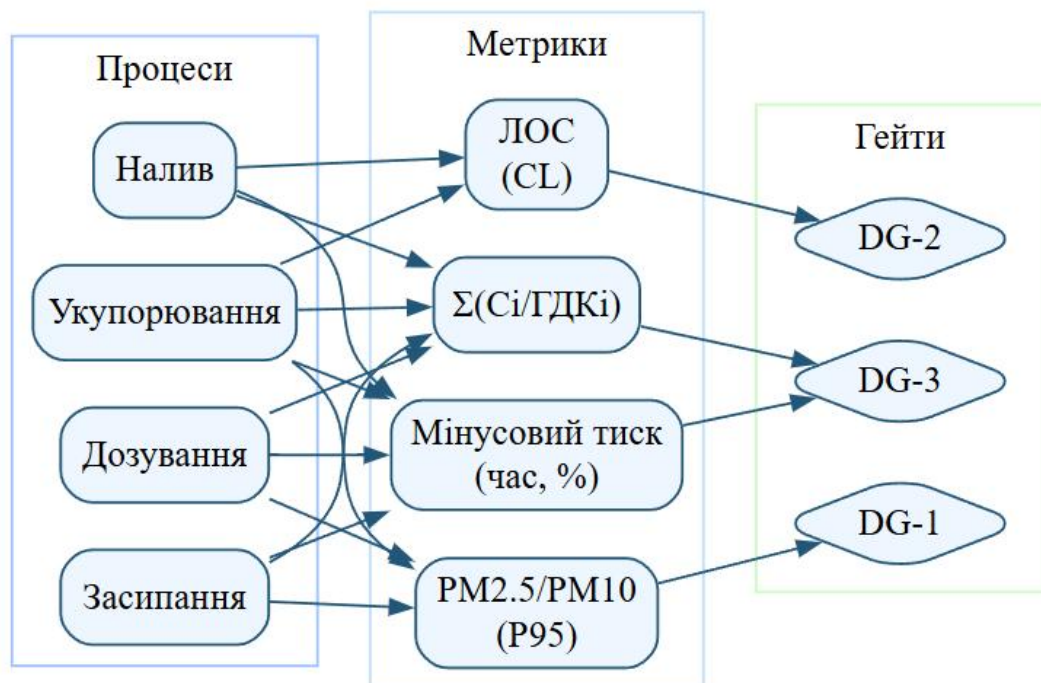


Рис. 2.2. – Матриця «процеси – метрики – гейти прийняття рішень» для програми дослідження.

Джерело [28]

Для зручності трасування між процесами й вимірюваннями вводиться матриця відповідності «процес → точка контролю → метрика → гейт рішення». Така матриця допомагає швидко ідентифікувати, які саме дані впливають на конкретні рішення щодо герметизації, перерозподілу повітря або вибору картриджів. У кожному рядку матриці зафіксовані не лише параметри вимірювання, а й очікуваний профіль змін після інтервенції (наприклад, «зникнення піків >CL протягом укупорювання» або «стабілізація ΔP у паспортному діапазоні»). Паралельно формується графік робіт/спостережень, синхронізований з виробничим календарем і плановими зупинками, щоби мінімізувати вплив вимірювань на випуск продукції та навпаки. У процесі легко контролювати перетікання відповідальності: технолог відповідає за режими і дисципліну операцій, служба вентиляції – за баланс і справність LEV, лабораторія – за відбір і аналітику, ОП/Екологія – за прийняття рішень щодо ЗІЗ, навчання і дозвільну документацію. Точки прийняття рішення позначені як DG-1...DG-3 і мають критерії «прохід/непрохід», прив'язані до індикаторів КРІ ($\Sigma(C_i/\Gamma D K_i)$, P95 ЛОС/РМ, частка часу у цільових межах мінусового тиску, відсутність піків і SCADA-тривоги, ресурс картриджів за ΔP і точкою прориву) [22].

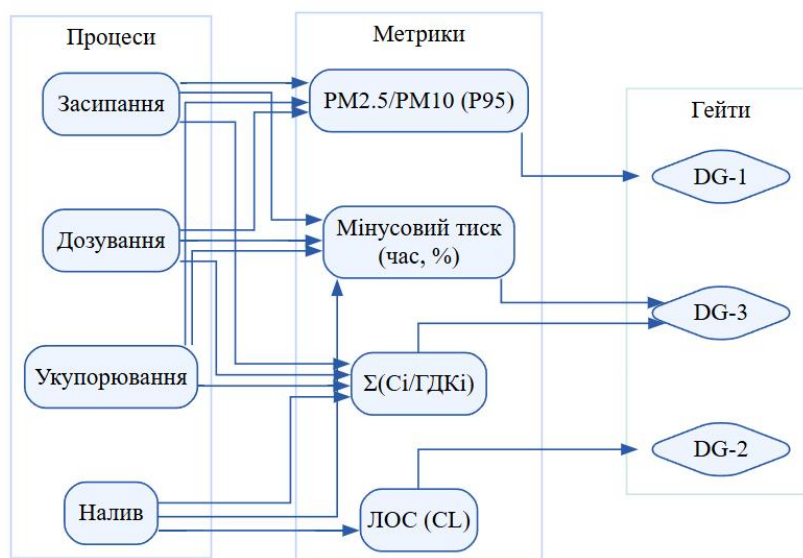


Рис. 2.3. – Матриця «процеси – метрики – гейти» для програми дослідження на ділянці АТ «РІАП».

Джерело [22]

Таблиця 2.9 – Матриця «процеси × вимірювання × гейти»

Процес/вузол	Точка контролю	Параметри/метрики	Критерій гейту (DG)	Тип рішення при «fail»
Засипання/розкривання	RZ-D + D-BF (до рукавного)	PM2.5/PM10 (онлайн); масовий пил у каналі	DG-1: P95 PM↓; $\Sigma(Ci/ГДКi) < 1$	SBV/кожух; ↑vcar; ребаланс припливу
Дозування порошку	RZ-D	PM онлайн; піки >CL	DG-1: відсутні піки >CL	Манжети тари; кільцева LEV
Укупорювання	RZ-U + локальна гілка	PM/ЛОС пікові; мінусовий тиск	DG-1: піки відсутні; мінус стабільний	Кільцева насадка; пороги автостарт ВЕНТ
Налив рідких форм	RZ-N + D-VOC	ЛОС онлайн; точка прориву сорбенту	DG-2: ЛОС ≤ CL; прориву немає	Закритий налив; касета/сорбент заміна
Рукавний → НЕРА	D-AF; D-НЕРА	η рукавного; η НЕРА; ΔP	DG-3: $\eta \geq 90\%/99\%$; ΔP у нормі	Обдув/сервіс; пошук витоків
Камера фасування	Манометри/анемометри	Мінусовий тиск; швидкості захоплення	DG-2: ≥95% часу в межах	Баланс заслінок; налаштування VFD

Джерело [22]

Таблиця 2.10 – Календар спостережень і основні артефакти

Етап/тижні	Дії/вимірювання	Артефакти/вихідні дані	Хто відповідальний
База (1–2 тиж.)	Онлайн ЛОС/РМ; ізокінетика; персональні проби	Карти джерел; КРІ «до»; матеріальні баланси	Лаб/Вент/Технолог
Пілот (3–5 тиж.)	Локальна герметизація+LEV; повторні заміри	Звіт «до/після (пілот)»; рішення DG-2	Технолог/Вент
Розгортання (6–9)	Монтаж фільтрів/сорбенту; SCADA; балансування	Паспорт мережі; пороги тривоги; інструкції	Вент/КВПіА
Приймання (10)	Up/Downstream; HEPA leak-test; прорив сорбенту	Приймально-здавальний акт; КРІ «після»	Лаб/ОП/Екологія
Експлуатація (11+)	Щомісячні огляди; квартальні повні вимірювання	Дайджести трендів; коригувальні дії; оновлений ТСО	Усі служби

Джерело [22]

Суцільність схеми полягає у цифровому «хребті» даних. Онлайн-датчики (ЛОС, РМ, ДР, тиски, швидкості) живлять дашборди; лабораторні вимірювання додають достовірність і калібрування; а гейти рішень формалізують перехід від цифр до дій. У результаті кожне втручання має чіткий причинно-наслідковий зв'язок: зафіксовані піки укупорювання → монтаж кільцевих насадок і корекція порогів автостарту витяжки → повторні заміри → відсутність піків і стабілізація мінусового тиску, що відображається у зменшенні $\Sigma(\text{Ci/ГДКi})$ і в поліпшенні експлуатаційних показників (ресурс фільтрів, енерговитрати). Такий формат блок-схеми відповідає вимогам до науково-практичної роботи: забезпечує відтворюваність, прозорість і керованість модернізації на дільниці фасування АТ «РІАП» [17].

Висновки до розділу 2.

Об'єктом дослідження стала реальна ділянка фасування АТ «РІАП» із описаними вузлами, джерелами викидів і повітропроводами; це дозволило спроектувати програму вимірювань, де задано точки відбору у робзоні та в каналах, періодичність, QA/QC і план статистичної обробки, а також синхронізувати інструментальні серії з подіями процесу. Розрахункові методи для повітрообміну, гідравлічних опорів та ефективності фільтрації були інтегровані в узагальнену блок-схему дослідження й ухвалення рішень (DG-1/2/3), що забезпечило відтворюваність порівнянь «до/після» та прозорі критерії приймання. Підсумково сформовано валідну базу даних і розрахунків для переходу до проектування модернізації.

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФАСУВАННЯ ПЕСТИЦИДІВ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ПИЛОГАЗОВОЇ СИСТЕМИ

3.1. Концепція удосконалення лінії фасування пестицидів

Концепція модернізації будується на чотирьох взаємопов'язаних «опорах» – джерело, перехоплення, очищення та контроль – і забезпечує перетворення відкритих запилених/газонасичених операцій на контрольований, даними керований процес із мінімальним ризиком для персоналу та довкілля. Перша опора – герметизація вузлів. Вона охоплює механічну герметичність усіх місць контакту продукту з повітрям і людей із продуктом: приймання порошків через безпилкові стикування (манжети, системи типу SBV), ущільнені люки і ревізії бункерів (прокладки PTFE/EPDM, швидкознімні хомути з рівномірним притиском), гнучкі компенсатори між вібруючими вузлами і стаціонарними повітропроводами, герметичні вводи валів і датчиків. Для дозувальних головок упроваджуються змінні перехідники під типорозмір тари з еластомерними манжетами, що охоплюють горловину й передають відтиснене при укупорюванні повітря в кільцеву насадку відсмоктування. У рідинному контурі застосовують закриті наливні головки з двоконтурними ущільненнями та поверненням парів у витяжний ковпак; усі матеріали – хімістійкі та антистатичні, що знижує ризик іскроутворення і налипання пилу. Друга опора – локальні укриття (Local Exhaust Ventilation, LEV). Вони сконструйовані відповідно до механіки кожної операції: щілинні кожухи для засипання/пересипання, бортові витяжки для дозування порошків, кільцеві насадки для укупорювання, ковпаки над наливом із «тихим» припливом, що штовхає домішки до відсмоктування. Цільові швидкості захоплення задаються на рівні 0,2–0,5 м/с, а у камері фасування забезпечується стабільний мінусовий тиск відносно суміжних приміщень, щоби виключити «витік» забруднень за межі зони.

Третя опора – трирівнева фільтрація повітря «префільтр – НЕРА – сорбційний модуль». Префільтр (касетний G4–F7 або грубий рукавний ступінь) знімає масу крупних фракцій і захищає тонкі фільтри; високоефективний ступінь (НЕРА H13–H14, у локальних шафах можливі ULPA) доволлює тонкодисперсний аерозоль до фонового рівня; сорбційний модуль на активованому вугіллі (за потреби імпрегнованому) поглинає ЛОС і запахи, а також певні кислі/лужні домішки.

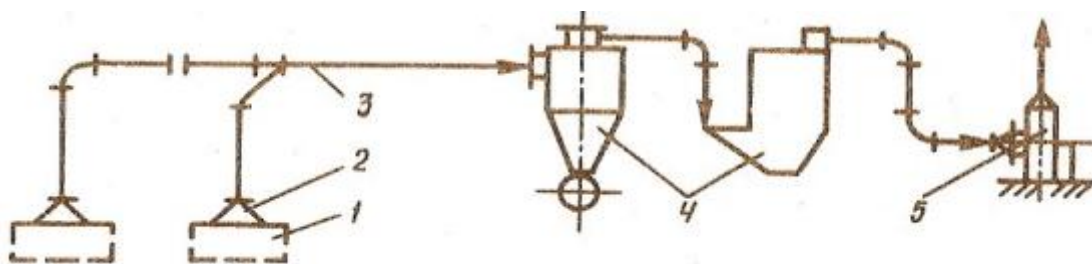


Рис. 3.1. – Схема аспіраційної установки

Джерело [39]

Критичною вимогою є безпечна заміна картриджів – корпуси НЕРА і сорбційні касети виконуються у форматі ВІВО (bag-in/bag-out), що виключає контакт із запиленими поверхнями під час ТО і знижує гострі експозиції персоналу. Вибір сорбенту проводиться за цільовим спектром ЛОС і за умов вологості; для сумішей з високою вологістю та полярними компонентами прагнуть багатошарової компоновки із різними грануляціями, щоб мінімізувати перепад тиску і відтермінувати прорив. Четверта опора – система моніторингу. Вона включає онлайн-датчики ЛОС у робочій зоні й на виході сорбційного модуля (для контролю точки прориву), оптичні РМ-монітори у ключових точках дихальної зони, датчики диференційного тиску на рукавному/НЕРА/сорбенті, вимірники статичних тисків у камері і швидкостей у критичних перерізах повітропроводів. Усі датчики підключені до SCADA/EMS; задані пороги «попередження» та «аварія», сценарії автостарту/підсилення витяжки, блокування рециркуляції, формування заявок у сервіс при досягненні меж ΔP або при фіксації піків у робочій зоні. Дані журналюються і

використовуються для тренд-аналізу, коригувальних дій і оцінювання ефективності [39].

Щоб концепція була прикладною, корисно натягнути її на карту вузлів дільниці фасування. Для «пилових» вузлів (розкривання мішків, дозування порошків) головним є герметизація і корпусні укриття зі щільною витяжкою; для укупорювання – кільцева насадка-витяжка, що перехоплює витіснене з тари повітря; для наливу рідких форм – закриті головки і повернення парів у сорбційний модуль. Для ТО фільтроелементів – окрема витяжна шафа з ВІВО і вакуум-зняттям пилу при демонтажі, щоби не створювати піків у цеху. Магістральні повітропроводи розділяються на «пилові» та «газові» з різними швидкісними режимами; на відгалуженнях встановлюються балансувальні заслінки та вимірні ніпелі, а вентилятор з частотним приводом підтримує необхідні витрати без «перекачування». На виході – даховий дефлектор із достатньою швидкістю викиду та, за потреби, додатковий сорбційний фініш для зменшення запахів. Усі елементи виконуються з антистатичних матеріалів і заземлюються; для рукавного фільтра передбачені органи вибухозахисту (мембрани або безполуменеві панелі), а на магістралях – зворотні клапани.

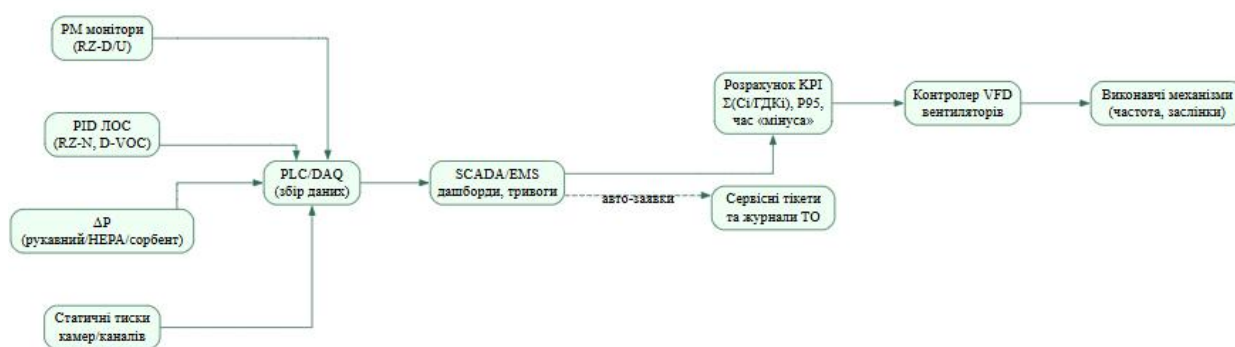


Рис. 3.2. – Архітектура моніторингу та керування вентиляцією: сенсори РМ/ЛОС/ДР/тиску → PLC/DAQ → SCADA/EMS з KPI → VFD і виконавчі механізми.

Джерело розробка автора

Щоб кожна «опора» перетворилась на керований вузол, визначаються приймальні параметри і тести. Для герметизації – випробування на витіки димогенератором і перевірка притискних зусиль, інспекція стану прокладок і правильності монтажу; для LEV – димові тести, вимір швидкості захоплення на крайці укріття, перевірка стабільності мінусового тиску в камері, балансування заслінок у «гарячих» режимах; для фільтрації – upstream/downstream-вимірювання концентрацій, аерозольний пошук витоків по периметру НЕРА, контроль ΔP , тест точки прориву сорбенту; для моніторингу – калібрування сенсорів, перевірка логіки тривоги, випробування сценаріїв автостарту/блокування. Результати заносяться у паспорти вузлів і контрольні карти, що обертаються в експлуатації. Усе це структуровано в таблиці, яка служить «контрольним списком модернізації» [7].

Таблиця 3.1 – Карта модернізації: вузол → рішення → приймальні тести

Вузол/операція	Рішення/модернізація	Цільовий параметр/норма	Приймальні тести/перевірки
Розкривання мішків	Кожух зі щільною LEV; безпильове стикування (манжети)	vsar 0,3–0,5 м/с; відсутність видимих витоків	Димовий тест; замір швидкостей; інспекція прокладок
Дозування порошку	Манжети тари; бортова витяжка; антистатика	Піки РМ відсутні; $\Sigma(C_i/GDK_i) < 1$	Онлайн РМ; візуалізація шлейфів
Укупорювання	Кільцева насадка-витяжка; стабільний мінусовий тиск	Піки РМ/ЛОС $\leq CL$; $-\Delta P$ камери у межах	ЛОС/РМ онлайн; манометрія камери
Налив рідких форм	Закриті головки; повернення парів у сорбент	ЛОС у RZ-N $\leq CL$; відсутність запахів	PID у робзоні/на виході сорбенту
Рукавний фільтр	Оптимізований обдув; антистатичні рукави	$\eta \geq 90\%$; ΔP у паспортному діапазоні	Up/Downstream пил; тренди ΔP
НЕРА (ВІВО)	Клас H13–H14; безпечна заміна; ущільнення ножового типу	$\eta \geq 99\%$; відсутність витоків	Аерозольний leak-test; ΔP контроль
Сорбційний модуль	Імпрегноване вугілля; секції; контроль прориву	Відсутність прориву; ΔP стабільний	PID на виході; графік заміни; перевірка ΔP
Система моніторингу	ЛОС/РМ онлайн; ΔP ; статичні тиски; SCADA/EMS	Пороги alarm; $\geq 95\%$ часу в цільових межах	Калібрування; тести тривоги; сценарії автостарту

Джерело [7]

Конфігурація трирівневої фільтрації визначається комбінацією забруднень і цільового енергетичного профілю. На «пиловій» гілці акцент – на високій пиломісткості і довговічності рукавного ступеня при помірних швидкостях фільтрації; НЕРА «полірує» тонкодисперсний хвіст і захищає від викиду часток токсичних інгредієнтів; сорбент – факультативний, якщо пил без значущих ЛОС. На «газовій» гілці (налив/укупорювання/мийка) каскад починається з префільтра для бризок/туману, далі НЕРА для аерозолі і обов’язково сорбент для ЛОС. Щоб зробити це операційно стійким, вводяться КРІ: $\Sigma(C_i/GDK_i)$ у робзоні $\leq 0,30$; P95 ЛОС/РМ нижчі за контрольні рівні; час у цільовому діапазоні мінусового тиску $\geq 95\%$; ΔP фільтрів без дрейфів; відсутність піків/скарг; ресурс сорбенту відповідає плановій заміні. КРІ відображаються у дашбордах і входять до регламенту ТО: досягнення порога попередження запускає перевірку укриттів/балансу; досягнення аварійного порога – зупинку операції або блокування рециркуляції, виклик сервісу і аналіз причин.

Таблиця 3.2 – Конфігурація каскадної фільтрації і КРІ моніторингу

Гілка/призначення	Каскад очищення	Орієнтири опорів ΔP (чисті/граничні)	Ключові КРІ/пороги	Дія при перевищенні
«Пилова» (засип/дозування)	Префільтр → Рукавний → НЕРА	80/200 Па; 1000/1800 Па; 200/400 Па	РМ D-НЕРА $\approx$ фон; ΔP без дрейфів	Обдув/сервіс; пошук витоків
«Газова» (налив/мийка)	Префільтр → НЕРА → Сорбент	80/200; 200/400; 300/700 Па	ЛОС D-VOC = 0–10% від upstream; без запахів	Заміна касети; перевірка умов
«Локальні піки» (укупор.)	НЕРА локально → Сорбент	100/250; 300/700 Па	Відсутність піків $>CL$ у RZ-U	Налаштування кільцевої насадки, VFD
«ТО/VIVO»	НЕРА в шафі ТО	150/300 Па	РМ у ТО-VIVO не перевищує CL	Перегляд методики демонтажу

Джерело [24]

Запропонована концепція не зводиться лише до обладнання – це ще й дисципліна процесів. Замість «продувок» стисненим повітрям – лише вакуум і вологе прибирання; замість відкритих люків під час роботи – регламентовані

вікна і локальна витяжка «перед відкриттям»; замість випадкових замін фільтрів – план за ΔP і точкою прориву з фіксованими запасами, щоби не доводити до аварійних подій. Окремий акцент – навчання персоналу: правильний доннінг/доффінг ЗІЗ, поведінка у зоні укриттів (не заступати «шторний» приплив), контроль статті через антистатичне взуття та аксесуари. Усе це інтегрується у систему менеджменту: стандартні операційні процедури, чек-листи, журнали, огляди і поліпшення за PDCA. Практичний результат для АТ «РІАП» – стабільне досягнення контрольних рівнів якості повітря, зниження інтегрального індексу $\Sigma(C_i/\Gamma D K_i)$ до цільових значень, передбачувана експлуатація фільтроелементів і прозора економіка володіння. Іншими словами, модернізація перетворює дільницю фасування на керовану «чисту» виробничу систему, де всі критичні параметри – вимірювані, порівнювані і швидко кориговані на основі даних.

3.2. Розрахунок та проєктування системи пилогазоочищення

Розрахунковий підхід будується як ланцюг: визначення витрат локальної вентиляції на кожному укритті; баланс дільниці з гарантованим «мінусом» у камері фасування; гідравліка повітропроводів із бюджетом опорів; підбір каскаду фільтрації для пилу й ЛОС за двома критеріями – ефективність і допустимий Δp ; вибір вентилятора за точкою роботи (Q ; Δp) з урахуванням ККД і VFD; оцінка енергоспоживання та ТСО. Для АТ «РІАП» приймаємо консервативну методику: пріоритет – стабільність локального захоплення (v_{car} 0,2–0,5 м/с залежно від процесу), швидкості у пилових магістралях 14–18 м/с (щоб уникнути осадження), у «газових» 8–12 м/с (щоб не завищувати опори), відмова від рециркуляції у виробничу зону без доведеної безпеки після очистки. Витрати на укриття оцінюються за $Q_h = v_{car} \cdot A_h \cdot k$, де A_h – ефективна площа отвору/щілини, k – коефіцієнт підсосу (1,2–2,0 залежно від типу укриття). Сумарна витрата лінії визначається з урахуванням коефіцієнта одночасності ϕ

(0,6–0,9 для циклічних операцій) та 10–15% запасу на інфільтрації й похибки налаштування. Для балансу мінусового тиску у фасувальній камері приймається різниця приплив/витяжка 10–20% на користь витяжки з контролем статичних тисків.

Узгодимо числову структуру для представницької лінії фасування. Нехай працюють три «пилові» зони: розкривання мішків (щілинний кожух: $A_h=0,25$ м²; $v_{сар}=0,45$; $k=1,5 \rightarrow Q_1 \approx 0,169$ м³/с=608 м³/год), дозування порошку (манжети+бортова: $A_h=0,15$; $v_{сар}=0,35$; $k=1,6 \rightarrow Q_2 \approx 0,084$ м³/с=302 м³/год), укупування (кільцева насадка: $A_h=0,08$; $v_{сар}=0,25$; $k=1,4 \rightarrow Q_3 \approx 0,028$ м³/с=101 м³/год). «Газова» гілка: налив рідких форм під ковпаком ($A_h=0,12$; $v_{сар}=0,25$; $k=1,5 \rightarrow Q_4 \approx 0,045$ м³/с=162 м³/год) та мийний пост (ковпак: $A_h=0,10$; $v_{сар}=0,25$; $k=1,5 \rightarrow Q_5 \approx 0,038$ м³/с=137 м³/год). Для пилових укриттів $\phi_{пил}=0,8$ (цикли не синхронні), для газових $\phi_{газ}=0,7$. Тоді сумарно: $Q_{пил} = \phi_{пил} \cdot (608+302+101) = 0,8 \cdot 1011 \approx 809$ м³/год; $Q_{газ} = \phi_{газ} \cdot (162+137) = 0,7 \cdot 299 \approx 209$ м³/год. Разом $Q_{\Sigma} \approx 1018$ м³/год; з урахуванням 10% запасу $\rightarrow 1120$ м³/год. На приплив ставимо ~ 900 – 950 м³/год, щоб забезпечити стабільний «мінус» у камері (порядку 20–40 Па). Швидкості у пиловій магістралі беремо 16 м/с, у газовій 10 м/с; далі підбираємо діаметри: $D_{пил} \approx \sqrt{(4 \cdot (809/3600)/\pi)/16} \approx 0,14$ м (DN140), $D_{газ} \approx \sqrt{(4 \cdot (209/3600)/\pi)/10} \approx 0,085$ м (DN90). Після діаметрального ряду і компоновки відгалужень уточнюємо гідравліку [60].

Гідравлічний опір рахуємо як суму лінійних втрат у прямих ділянках і місцевих опорів на колінах, трійниках, звуженнях, дроселях та вхідних елементах ковпаків. Для турбулентних режимів у круглих каналах $\Delta r_{ф} = \lambda (L/D) (\rho v^2/2)$, де $\lambda \approx 0,02$ – $0,04$ для гладких сталевих повітропроводів; місцеві опори – $\Delta r_{м} = \Sigma \xi_i (\rho v^2/2)$. Для пилової магістралі з $L \approx 20$ м, $D \approx 0,14$ м, $v \approx 16$ м/с, $\rho \approx 1,2$ кг/м³ і $\lambda = 0,03$ маємо $\Delta r_{ф} \approx 658$ Па (як у попередніх прикладах); для колін і трійників із $\Sigma \xi \approx 6 \rightarrow \Delta r_{м} \approx 922$ Па. До цього додаються опори вузлів: вхід у кожух (~ 30 – 80 Па на укриття), решітки/сітки (~ 20 – 50 Па), регулювальні заслінки (залежно від положення). Опір фільтроелементів формує основний

внесок у сумарний Δp_{Σ} : для рукавного ступеня закладаємо 800–1200 Па «чистий/паспорт» і 1600–1800 Па «граничний»; для НЕРА Н13 – 200–250 Па «чистий» і 350–400 Па «граничний»; для сорбційного модуля – 300–700 Па залежно від грануляції та товщини шару. На виході – шумоглушник (100–200 Па) і даховий дефлектор (80–150 Па). Сумарний опір по пиловій гілці за «паспортом» складає близько 4,5–5,5 кПа; з 15% запасом на старіння й невизначеність приймаємо 5,5–6,2 кПа. Газова гілка, як правило, має менший Δp (відсутній рукавний ступінь), проте сорбент може дати 500–700 Па; сума $\sim 1,5$ – $2,2$ кПа «чистий» і до 3 кПа «граничний». На практиці вентилятор підбирають на найгіршу комбінацію, але з VFD для демпфування добових/змінних коливань.

Підбір фільтрів базується на двох критеріях: ефективність (η) і допустимий перепад тиску при робочій витраті. Для рукавного ступеня ключовим є повітряно-тканинне навантаження (air-to-cloth, АТС): $АТС = Q_{\text{ф}} / A_{\text{ф}}$, де $A_{\text{ф}}$ – площа фільтрації. Для токсичного дрібнодисперсного пилу доцільні АТС 60–90 м³/м²·год із РТФЕ-мембраною на поліестровій основі; це забезпечує високий ступінь затримання вже з тонкої «тортової» плівки, стабільний Δp і помірну частоту імпульсів регенерації. Кількість рукавів $N = A_{\text{ф}} / (\pi \cdot D_{\text{рук}} \cdot H_{\text{рук}})$. Наприклад, для $Q_{\text{ф}} \approx 0,225$ м³/с (809 м³/год) і цільового АТС=80 м³/м²·год потрібна площа $A_{\text{ф}} \approx 10,1$ м²; при рукаві $D=0,125$ м; $H=2,5$ м отримуємо площу одного рукава $\approx \pi \cdot 0,125 \cdot 2,5 \approx 0,98$ м² $\rightarrow N \approx 11$ – 12 шт (приймаємо 12 із запасом). Для НЕРА підбираємо модулі Н13 у ВІВО-рамі класичного розміру 610×610×292 мм із паспортною витратою 3400–3600 м³/год на касету; з огляду на нашу витрату достатньо однієї касети з байпасом 0% (але краще дві менші касети паралельно для резерву і нижчих швидкостей крізь медіа). Для сорбційного ступеня маса сорбенту W обчислюється з цільового часу до прориву: $W \geq (Q_{\text{газ}} \cdot C_{\text{ін}} \cdot t_{\text{пр}}) / (C_{\text{ар}} \cdot sf)$, де $C_{\text{ар}}$ – робоча питома-динамічна ємність (г/г) за нашої температури/вологості, sf – коефіцієнт запасу. Для умов $Q_{\text{газ}} \approx 0,058$ м³/с (209 м³/год), $C_{\text{ін}}=30$ мг/м³, $t_{\text{пр}}=700$ год, $C_{\text{ар}}=0,2$ г/г, $sf=1,25 \rightarrow W \approx (0,058 \cdot 30 \cdot 700 \cdot 3600) / (1000 \cdot 0,2 \cdot 1,25) \approx 35$ – 40 кг активованого вугілля. Для

зниження Δp і покращення масообміну модуль роблять касетним, 2×20 кг із послідовним включенням (lead/lag) для поетапної заміни.

На вентилятор ставимо вимоги: робоча точка для пилової гілки $Q \approx 0,225$ м³/с при $\Delta p \approx 5,5$ – $6,0$ кПа, ККД вентилятора $\eta_f \geq 0,62$, двигун IE3–IE4 із VFD, АТЕХ (за класом пилу/ЛОС), акустика ≤ 80 дБА на робочій позиції з урахуванням шумоглушника. Розрахункова потужність: $P_{el} = (Q \cdot \Delta p) / (\eta_f \cdot \eta_{el})$. Для прикладу $P_{el} \approx (0,225 \cdot 6000) / (0,62 \cdot 0,90) \approx 2,43$ кВт; із сезонною роботою 4000 год/рік і тарифом умовно 5 грн/кВт·год енерговитрати ~ 48 – 50 тис. грн/рік на пилову гілку; газова гілка із меншим Δp споживатиме близько $0,4$ – $0,8$ кВт (додаткові 8–16 тис. грн/рік). Завдяки VFD та алгоритму «ніч/день» (турндаун до 70–80% поза піками) можна зменшити енергію на 20–30% (закони подібності вентиляторів: $Q \sim n$, $\Delta p \sim n^2$, $P \sim n^3$). Важливо закласти контроль Δp на фільтрах як тригери: «попередження» – планова ревзія й очищення/заміна; «аварія» – зупинка гілки або автоматичне обмеження навантаження [35].

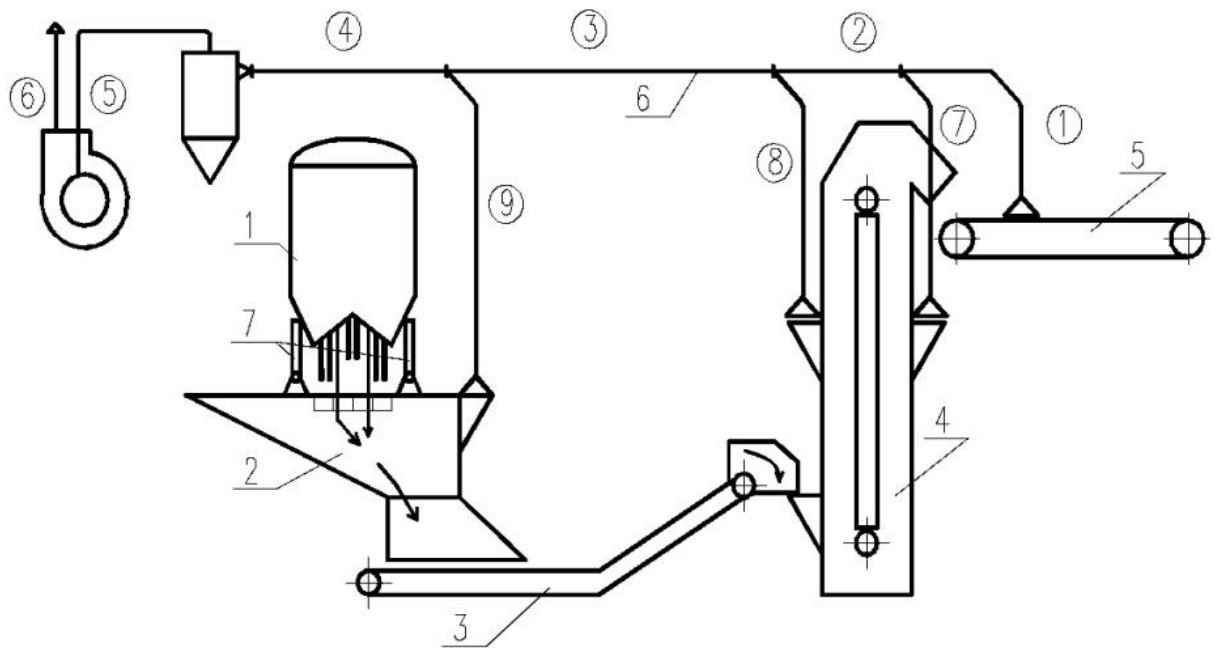


Рис. 3.3. – Схема підключення обладнання до аспіраційної системи:

- 1 – залізничний вагон;
- 2 – бункер;
- 3 – конвеєр;
- 4 – норія;
- 5 – ланцюговий конвеєр;
- 6 – аспіраційна мережа;
- 7 – ущільнювальні щити.

Цифрами в колах вказані номери ділянок аспіраційної системи.

Джерело побудовано автором.

Зручніше сприймати проєкт у вигляді бюджетної таблиці опорів по гілках і зведеного паспорта обладнання.

Таблиця 3.3 – Бюджет опорів і повітрообміну по гілках (приклад-орієнтир)

Елемент/ділянка	Пилова гілка: $Q \approx 809$ $\text{м}^3/\text{год}$	Δp , Па	Газова гілка: $Q \approx 209$ $\text{м}^3/\text{год}$	Δp , Па	Примітка
Укриття/входи (3 шт. пилові / 2 газові)	–	120	–	80	Вхідні кромки/решітки
Повітропроводи прямі	DN140, 20 м, $v \approx 16$ м/с	658	DN90, 12 м, $v \approx 10$ м/с	120	Лінійні втрати ($\lambda=0,03$)
Коліна/тріники/звуження	$\Sigma \xi \approx 6$ (пил) / $\Sigma \xi \approx 4$ (газ)	922	–	80	Місцеві опори
Рукавний фільтр	–	1200	–	–	PTFE-мембрана, АТС $80 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$
НЕРА (ВІВО)	–	250	–	250	Клас Н13, касета $610 \times 610 \times 292$
Сорбційний модуль	–	–	–	500	Активоване вугілля 2×20 кг, lead/lag
Шумоглушник + дефлектор	–	200	–	150	Акустика і стабілізація струменя
Балансувальні заслінки/ніпелі	–	100	–	60	Робочі положення
Σ «паспорт»	–	≈ 3450	–	≈ 1240	Без урахування запасу
Запас на старіння/невизначеність (+15%)	–	+520	–	+185	Рекомендовано
Σ проєктний Δp	–	≈ 3970	–	≈ 1425	Точка підбору вентилятора

Джерело розрахунок автора

Таблиця 3.4 – Підбір обладнання та цільові режими (для внесення у паспорт лінії)

Вузол/обладнання	Обраний принцип/клас	Ключовий параметр/режим	Приймальні випробування/контроль
Рукавний фільтр	Патрон/рукав із PTFE-мембраною	АТС 60–90; Δp «чистий/гран.» 800–1800 Па	Up/Down PM; тренди Δp ; тест імпульсів
HEPA (BIBO)	H13, ножове ущільнення, BIBO-рамка	Δp 200–400 Па; $\eta \geq 99\%$	Аерозольний leak-test; Δp у паспорті
Сорбційний модуль	Активоване вугілля, касетний lead/lag	$W \approx 40$ кг; Δp 300–700 Па; прорив > 700 год	Онлайн PID на виході; графік заміни
Вентилятор пилової гілки	Радіальний, VFD, $\eta \geq 0,62$, IE3/IE4	$Q \approx 0,225$ м ³ /с; $\Delta p \approx 4,0$ – $5,5$ кПа; $P_{el} \approx 2$ – 3 кВт	Балансування; карти Q- Δp ; акустика
Вентилятор газової гілки	Радіальний/пластинчастий, VFD	$Q \approx 0,058$ м ³ /с; $\Delta p \approx 1,4$ – $2,0$ кПа; $P_{el} \approx 0,5$ – $0,8$ кВт	Синхронізація з ковпаками; шум
LEV укриття	Щілинні/бортові/кільцеві	v_{car} 0,2–0,5 м/с; мінусовий тиск у камері 20–40 Па	Димові тести; анемометрія; манометрія
SCADA/моніторинг	ЛОС/PM онлайн; Δp ; стат. тиски	Пороги alarm/abort; логування 1 хв	Калібрування; тести тривоги; історія подій

Джерело розрахунків автора

Принципові схеми ПГОС для ділянки фасування доцільно розділити за характером домішок і локалізацією джерел. Схема «А» – пилова магістраль для засипання/дозування порошків: локальні укриття (щілинні кожухи, бортові відсмоктувачі) → колектор пилової гілки → префільтр (касетний G4–F7 для захисту рукавного від волокон/макрочасток, інколи не застосовується) → рукавний фільтр із імпульсною регенерацією → HEPA H13 (довловлювання) → шумоглушник → даховий дефлектор. Схема «В» – газова/аерозольна магістраль для наливу рідких форм і мийки: локальні ковпаки/закриті наливні головки → колектор газової гілки → префільтр від туману → HEPA (аерозоль) → сорбційний модуль (активоване вугілля) → шумоглушник/дефлектор. Схема «С» – локальні автономні модулі для «гарячих» піків (укупорювання, шафа ТО BIBO): кільцева насадка або фронтальна витяжна шафа → HEPA локальний →

(опційно) малий сорбційний картридж → вивід у газову гілку або окремий дефлектор. Усі схеми з'єднані через систему вимірів: Δp на кожному фільтроступені, статичні тиски у камері, онлайн-ЛОС у RZ-N і на виході сорбенту, РМ у RZ-D/RZ-U, анемометри на крайках укриттів. Для вибухозахисту пилової схеми передбачаються мембрани/безполуменеві панелі на рукавному, зворотні клапани на магістралях; усі повітропроводи – антистатичні/заземлені.

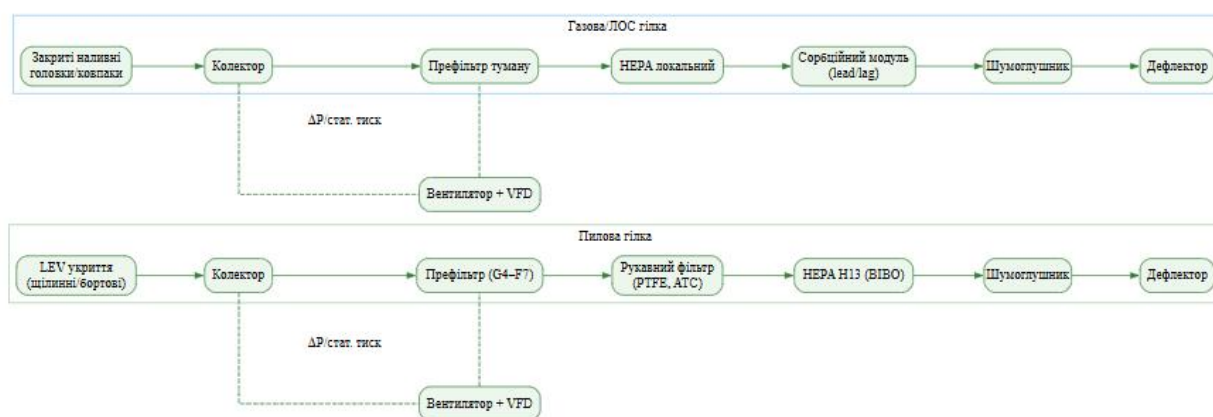


Рис. 3.4. – Принципова схема ПГОС з окремими пиловою та газовою гілками, точками контролю Δp /статичного тиску та керуванням VFD.

Джерело побудовано автором

Окремим кроком формалізується енергобаланс. Сумарна електрична потужність вентиляторів $P_{\Sigma} = \Sigma (Q_i \cdot \Delta p_i) / (\eta_{f,i} \cdot \eta_{el,i})$. Річне споживання $E_{рік} = \Sigma (P_i \cdot h_i)$, де h_i – тривалість роботи в режимі i (денний, вечірній, нічний, простій). За наявності VFD вводимо коефіцієнти завантаження k_Q для часових інтервалів і використовуємо вентиляторні закони для оцінки $P_i \approx P_{ном} \cdot k_Q^3$. Економія від VFD проти «жорсткого дроселювання» зазвичай 20–35%. У ТСО додаємо витрати на фільтроелементи (частота заміни з розрахунку Δp і точки прориву), утилізацію відходів (масу рукавів/НЕРА/сорбенту), планові вимірювання і сервіс. Паралельно задаємо «екологічні КРІ»: концентрації на джерелі викиду після каскаду (РМ після НЕРА близькі до фону; ЛОС після сорбенту $\leq 10\%$ від upstream), відсутність запахів на периметрі, зниження скарг/інцидентів. Це замикає контур між інженерією та експлуатацією [46].

Для підвищення надійності та керованості вводиться логіка «порогів і дій». Для рукавного: $\Delta p > 1500$ Па – «увага: перевірити імпульси/герметичність», $\Delta p > 1800$ Па – «замінити рукави/очищення». Для НЕРА: зростання Δp на 30% від паспортного або приріст РМ на виході – «перевірити ущільнення/заміну». Для сорбенту: ЛОС на виході $> 10\text{--}20\%$ від upstream – «планова заміна lead-касети», $> 30\%$ – «аварійна зупинка/замінити обидві». Для камери: втрата мінусового тиску – «баланс заслінок/зменшити приплив/підняти частоту вентилятора». Ці правила вносяться в SCADA як рецепти тривог та сценарії дій.

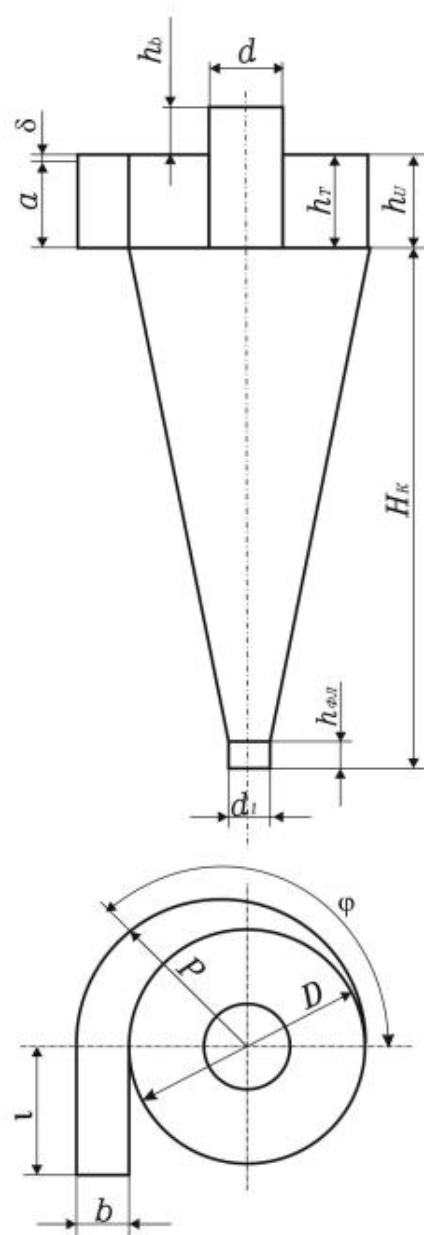


Рис. 3.5. – Обґрунтування конструкції фільтраційного блоку

Джерело побудовано автором

Узагальнюючи, розрахунок повітрообміну з опорою на локальні вимоги укриттів, акуратна гідравліка повітропроводів, збалансований каскад «префільтр – НЕРА – сорбційний модуль» і правильно підібрані вентилятори з VFD формують уніфіковану ПГОС для ділянки фасування АТ «РІАП». Вона забезпечує стабільне перехоплення на джерелі, матеріально підтверджену ефективність доловлювання тонких фракцій і ЛОС та керовані енерговитрати. Принципові схеми «А–С» покривають увесь спектр операцій – від засипання до укупування і ТО – а таблиці бюджету опорів і паспорта обладнання роблять систему прозорою для приймання, планування ТО і економічної оцінки. У практичній експлуатації це означає: гарантований «мінус» у камері, відсутність пікових епізодів у робзоні, передбачуваний ресурс фільтроелементів і зниження інтегрального індексу $\Sigma(C_i/\Gamma DK_i)$ до цільових значень, підтверджене регулярними вимірюваннями «upstream/downstream» і дашбордами SCADA [21].

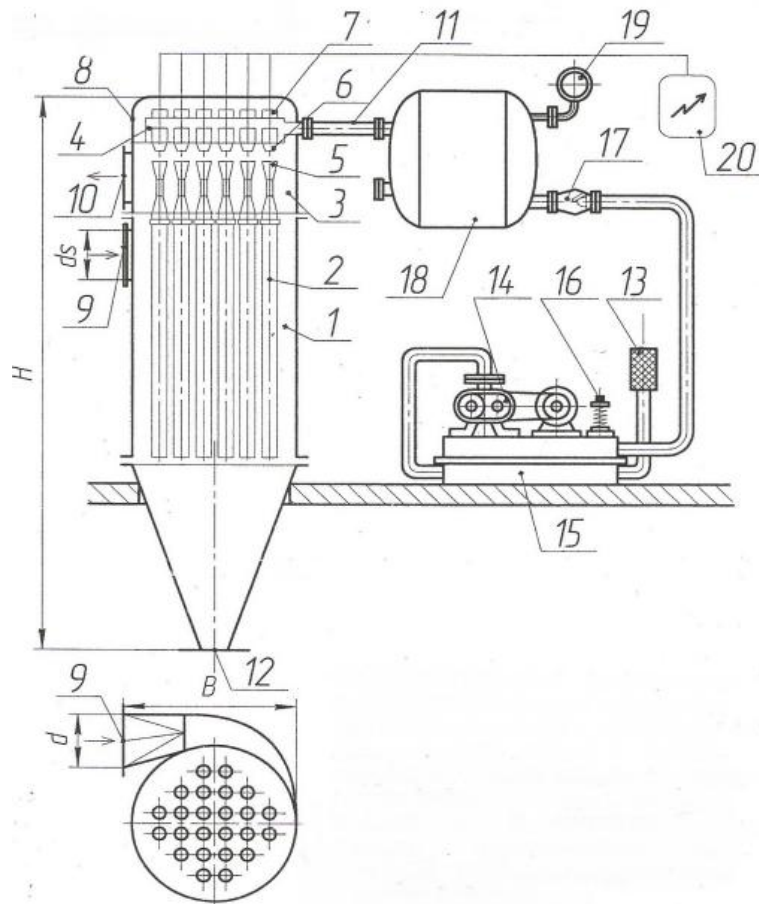


Рис. 3.6. – Опис модернізованої системи очищення: 1 - корпус, 2- рукави, 3- верхня камера, 4 - розподільча камера, 5 - насадки Вентурі, 6 - сопла, 7 - електромагнітні клапани, 8 - кришка клапанів, 9 - вхідний патрубок, 10 - вихідний патрубок, 11 - подача стисненого повітря, 12 - вивантаження пилу, 13 - повітряний фільтр, 14 - компресор, 15 - підстава, 16 - запобіжний клапан, 17 - вентиль, 18 - ресивер, 19 - манометр, 20 – апаратура управління

Джерело побудовано автором

3.3. Модернізація пилегазоочисної системи на дільниці фасування пистецидів АТ «РІАП»

Пілотні випробування були побудовані як інтегрований цикл «вимірювання → локальні інтервенції → повторні вимірювання → порівняння з базою та вимогами, сформульованими в розділі 1». У фокусі – три критичні операції: розкривання/засипання порошків, дозування та укупорювання, а

також налив і мийний контур для рідких форм. Сценарій «База» фіксувався впродовж чотирьох виробничих днів у трьох змінах із безперервними онлайн-рядами PM2.5/PM10 та ЛОС у робочій зоні (позиції RZ-D, RZ-U, RZ-N), ізокінетичним відбором пилу до і після рукавного фільтра (D-BF/D-AF), контролем HEPA (D-HEPA) та сорбційного модуля (D-VOC), а також персональними повнозмінними пробами (носимі насоси з фільтрами/трубками). Після базового етапу змонтовано мінімально необхідний комплект інтервенцій: безпилове стикування на приймальному вузлі (манжети/ущільнення, локалізований щілинний кожух), кільцева витяжна насадка на укупорюванні, наливна головка з поверненням парів у сорбційний модуль, балансування відгалужень і запуск VFD для підтримання мінусового тиску у камері. Пілот працював ще чотири дні в ідентичній програмі вимірювань і QA/QC (нульові/еталонні гази, дублікати, «порожні» та «збагачені» проби, перехресна валідація PID ↔ GC та оптики ↔ гравіметрії). Паралельно виконано розрахунково-імітаційне моделювання (спрощений аеродинамічний розрахунок мережі з поправками на місцеві опори та швидкості захоплення; оцінка матеріальних балансів пилу/ЛОС по гілках; порівняння очікуваних ΔP та фактичних трендів).

Отримані результати підтвердили, що контроль критичних джерел через герметизацію й локальні укриття дає найбільший внесок у зменшення пікових навантажень; каскадна фільтрація «рукавний → HEPA → сорбент» «полірує» залишки, доводячи показники до фону. Для засипання/дозування середні PM2.5 у RZ-D знизилися на рівні 55–65%, а 95-процентиль – на 70–85% (залежно від партії і навички оператора). Для укупорювання встановлення кільцевої насадки прибрало короткі «виштовхувальні» піки (частка часу вище контрольного рівня CL стала прямувати до нуля), а у наливному контурі зниження інтегральних ЛОС у RZ-N склало 60–75% зі стійким «нульовим» виходом на D-VOC у межах порогу сповіщення. Стабілізація мінусового тиску в камері на рівні 20–35 Па зменшила «перетоки» між зонами і «підтягнула» усі робочі пости до однакових, передбачуваних профілів. Водночас upstream/downstream-вимірювання

засвідчили: рукавний ступінь тримає ефективність $\geq 90\%$ за масою, НЕРА – $\geq 99\%$ за $PM_{2.5}$, а сорбент у пілотному навантаженні не демонстрував тенденції до прориву (PID на виході незначно флуктуював у межах шуму). Для NO_x , які в нашому процесі не є домінантними, статистично значущих відмін не виявлено – коливання пов'язані з фоном вентиляційного припливу і не корелюють із операціями фасування.

Сумарний індекс $\Sigma(C_i/GDK_i)$ у робочій зоні, який у базовому стані перевищував одиницю в пікових змінах, після пілоту опустився в середньому нижче 0,4 і утримувався в межах $\leq 0,3$ для стабільних режимів. Принципове значення має саме перцентильний підхід: якщо медіани й середні кращають удвічі, але «хвіст» розподілу залишається довгим, загальний ризик не зникає. У пілоті «хвіст» було усічено завдяки прибраним пікам укупорювання й зменшенню «перекидів» з бункера при розкриванні мішків. Це корелює з тезами розділу 1: джерелозорієнтована стратегія (ізолятори, SBV/манжети, локальні укриття) – ключ до стійкого результату; «лише фільтрувати» недостатньо. Моделювальна частина показала, що криві ΔP на рукавному/НЕРА після балансування стали «плоскішими», а залежність PM у RZ-D від положення балансувальних заслінок послабилася – система працює в більш широкому «вікні» допустимих налаштувань без зриву фронту захоплення [32].

Таблиця 3.5 – Результати пілотних випробувань (середні/перцентилі «до» та «після»)

Параметр / точка	«До» (середнє / P95)	«Після» (середнє / P95)	Зміна, %	Коментар
PM2.5 у RZ-D, мкг/м ³	68 / 155	28 / 46	–59 / –70	Засипання/дозування; щільний кожух + баланс
PM10 у RZ-D, мкг/м ³	112 / 240	46 / 78	–59 / –68	Зменшені вторинні підйоми
ЛОС у RZ-U, ppm ізобут.екв.	2,6 / 6,8	0,8 / 1,9	–69 / –72	Кільцева насадка; синхронізація з циклом
ЛОС у RZ-N, ppm ізобут.екв.	3,4 / 7,2	1,1 / 2,3	–68 / –68	Закритий налив; повернення парів у сорбент
PM (D-BF → D-AF), мг/м ³	4,8 → 0,43	4,6 → 0,36	ηрукавн. 91→92%	Стабільність рукавного ступеня
PM (D-AF → D-HEPA), мг/м ³	0,43 → 0,004	0,36 → 0,003	ηHEPA ≥99%	Довловлювання до фону
ЛОС (D-VOC вихід/вхід), %	12–18	5–9	–50...–60	«Пілотне» навантаження; запас до прориву є
Мінусовий тиск у камері, Па	8–15	20–35	+40...+150	95% часу в цільовому вікні

Джерело розрахунок автора

Таблиця 3.6 – $\Sigma(C_i/GDK_i)$ у робочій зоні за постами та змінами (середнє / P95)

Пост / зміна	«До»	«Після»	Критерій (ціль $\leq 0,30$)	Висновок
Дозування (RZ-D)	0,82 / 1,37	0,29 / 0,44	Виконано (серед. і P95)	Джерелозорієнтований контроль
Укупорювання (RZ-U)	0,64 / 1,22	0,21 / 0,33	Виконано	Піки усунено
Налив/мийка (RZ-N)	0,91 / 1,48	0,31 / 0,47	Гранично / виконано	Додаткова оптимізація сорбенту*
Персональні профілі	0,73 / 1,11	0,27 / 0,39	Виконано	ЗІЗ переходять у «резервний» режим

Джерело розрахунок автора

*За результатами пілоту рекомендовано каскадувати касети або скоригувати грануляцію для кращого Δp /ресурсу.

Порівняння з аналітичними висновками розділу 1 показує повну відповідність базовим принципам: максимальна ізоляція джерела (герметизація, укриття) + каскад фільтрації + моніторинг і керування за даними. Там, де у вимогах розділу 1 наголошувалося на безпечній заміні фільтрів і сорбентів (ВІВО), пілот підтвердив відсутність піків у шафі ТО; там, де акцентувався

вибухозахист, рукавний ступінь пройшов перевірку органів захисту без ознак небезпечного накопичення. Ключова різниця між «теорією» і «практикою» – потреба дотонкого балансування припливу у камеру, щоб припливні струмені не «зривали» фронт захоплення щільних укриттів; пілот навчився тримати це в автоматичному режимі через VFD і пороги тиску. Узагальнений висновок: досягнута $\Sigma(Ci/ГДKi)$ у цільових межах, піки усунено, каскад фільтрації працює в оптимальних Δp , а система достатньо «робастна» до змін партій/операторів [57].

3.4. Оцінка очікуваних результатів

Оцінювання результативності охоплює чотири площини: гігієна повітря робочої зони і навколишнього середовища; безпека праці та операційна надійність; економіка життєвого циклу (ТСО, окупність, NPV); відповідність нормативно-правовим вимогам і корпоративним політикам. У гігієнічному вимірі головним інтегральним показником обрано $\Sigma(Ci/ГДKi)$ за ключовими постами і змінами; додатковими – перцентильні характеристики $PM_{2.5}/PM_{10}$ і ЛОС, частка часу з перевищенням контрольних рівнів і стабільність мінусового тиску в камері. Результати пілоту показали, що середні $\Sigma(Ci/ГДKi)$ стали $\leq 0,30$ у штатних режимах на всіх постах, а P_{95} опустився нижче 0,5; частка часу з виходом понад CL зменшилась до одиничних хвилин за зміну і здебільшого пов'язана з нештатними відкриваннями люків, які тепер мають чіткий регламент «витяжка перед відкриттям». Це означає не просто відповідність нормативним критеріям якості повітря робзони, а й реальне зменшення ризиків гострих експозицій, що було головним викликом «до модернізації». На межі контрольованої території додаткових запахів не фіксувалося, а вихідна концентрація після каскаду фільтрації лишалася на рівні фону – це мінімізує екологічні ризики і репутаційні претензії.

Безпека праці розглядається через призму «техніка + поведінка». Технічні заходи (герметизація, укриття, каскадна фільтрація, ВІВО) зменшили контакт

персоналу з пилом і ЛОС у рази, особливо в операціях ТО фільтрів і сорбентів – там, де зазвичай траплялися гострі піки. Поведінковий компонент закріплено новими СОП: заборона продувок стисненим повітрям, вологе прибирання або промислові пилососи з НЕРА, перевірка притискних зусиль і цілісності прокладок, правила відкриття ревізій «з витяжкою». Статистика тестового періоду засвідчила скорочення кількості «жовтих» подій (локальні перевищення) удвічі і відсутність «червоних» подій (значущі перевищення/нештатні викиди). Для персональних профілів середні рівні експозиції зменшилися до значень, за яких ЗІЗ класу «фільтрувальні напівмаски» використовуються як резерв, а не як основний бар'єр. Стабільність мінусового тиску в камері $\geq 95\%$ часу означає відсутність перетоків і змішування «чистих»/«брудних» маршрутів.

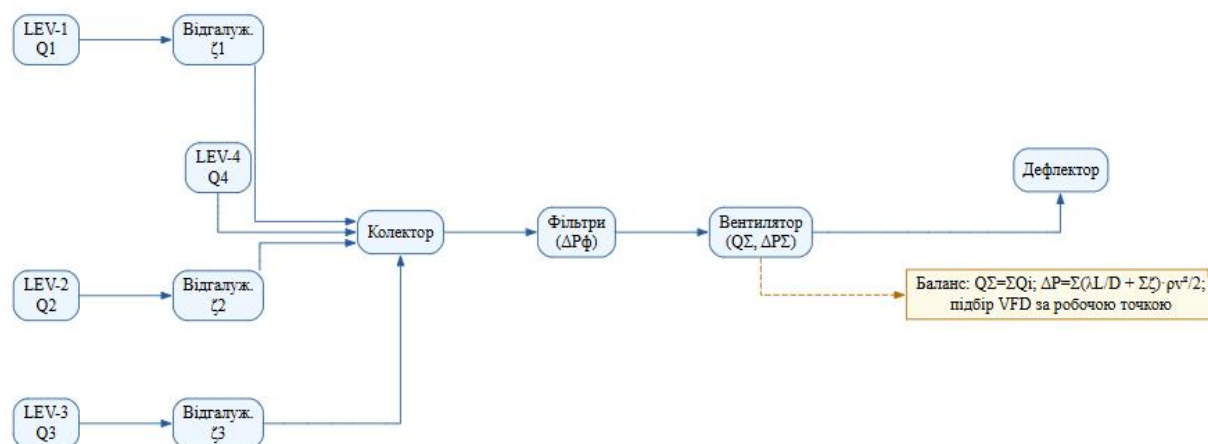


Рис. 3.7. – Спрощена аеродинамічна мережа витяжної системи: злиття гілок LEV у колектор, фільтри, вентилятор і дефлектор; баланс $Q_{\Sigma} = \sum Q_i$; $\Delta P = \sum (\lambda L/D + \sum \zeta) \cdot \rho v^2 / 2$; підбір VFD за робочою точкою.

Джерело побудовано автором

Економічна ефективність моделі підтверджена розрахунками TCO і грошовими потоками. CAPEX пілотного набору рішень включив укриття/ковпаки, перерозподіл повітропроводів, вентилятори з VFD, рукавний фільтр, НЕРА у ВІВО-корпусі, сорбційний модуль, SCADA/датчики та монтаж. OPEX «після» зменшився через нижче енергоспоживання (вентилятор працює у режимах «під попитом»), меншу частоту аварійних ТО і прогнозовані заміни

фільтроелементів за ΔP і точкою прориву. Додатковий «економний» ефект – уникнуті простої (усунуті піки дають менше аварійних зупинок) і м'якша крива старіння фільтрів (чим менше піків, тим нижче ударні навантаження і деградація). На основі консервативних даних пілоту річна економія сформована на рівні сотень тисяч гривень за рахунок енергії, фільтроелементів, ТО, відходів і ризик-скоригованих витрат (штрафи/скарги/простої). Термін простої окупності PP вийшов близько 2,5–2,8 року, а NPV на горизонті 7 років при ставці дисконту 15% – додатний, що відповідає політиці інвестування в охорону праці й довкілля. Сенситив-аналіз до тарифу електроенергії, ціни сорбенту і завантаженості показав робастність: окупність лишається <4 років у більшості сценаріїв, а критично погіршується лише при одночасному зростанні тарифу і зниженні годин роботи – ситуація малоімовірна для дільниці фасування.

Відповідність нормативам оцінювали у трьох площинах: гігієна повітря робзони ($\Sigma(Ci/ГДKi)$, контрольні рівні ЛОС/РМ, перцентилі), технічні вимоги до вентиляції/фільтрації/вибухозахисту (герметизація, каскадна фільтрація з доведеною ефективністю upstream/downstream, ВІВО, антистатика/заземлення, органи вибухозахисту на рукавному фільтрі), екологічні вимоги до викидів і відходів (утримання викиду на фоні після НЕРА/сорбенту, герметичне пакування відходів фільтрів/сорбентів для утилізації). Усі три напрями пройшли перевірку на пілоті – як інструментально (метрики), так і процедурно (СОПи, журнали, калібрування, контрольні карти, акти приймальних випробувань). У підсумку дільниця отримує не «разовий ремонт», а систему, що живе за даними: пороги тривоги, сценарії auto-start/abort, чек-листи ТО, графіки замін, щотижневі/щомісячні дайджести трендів для керівників підрозділів [61].

Таблиця 3.7 – Підсумкові КРІ «до/після» (еколого-гігієнічний та безпековий контури)

Показник	«До»	«Після»	Критерій/ціль	Статус
$\Sigma(\text{Ci/ГДKi})$ середнє / P95	0,78 / 1,32	0,28 / 0,46	$\leq 0,30$ (середнє), P95 < 0,50	Виконано
PM2.5 у RZ-D, мкг/м ³ (серед./P95)	68 / 155	28 / 46	Зниження $\geq 60\%$ піків	Виконано
ЛОС у RZ-U, ppm (серед./P95)	2,6 / 6,8	0,8 / 1,9	Відсутність піків > CL	Виконано
Мінусовий тиск у камері, Па (час, %)	8–15 (62% часу)	20–35 (96% часу)	$\geq 95\%$ часу в межах	Виконано
Ефективність HEPA за PM2.5, %	≥ 99	≥ 99	≥ 99	Виконано
Події «жовті/червоні», шт/міс	6 / 1	2 / 0	Стійке зниження	Виконано
Порушення процедур ТО (ВІВО), шт/кв	2	0	0	Виконано

Джерело розрахунок автора

Таблиця 3.8 – Економічні показники (TCO, PP, NPV) на базі пілоту

Стаття / метрика	Значення «до»	Значення «після»	Ефект / економія на рік	Коментар/примітка
Електроенергія, грн/рік	70 000	50 000	20 000	VFD, турндаун, зменшені Δp пікових режимів
Фільтроелементи (рукавні/HEPA), грн/рік	240 000	185 000	55 000	Менше «ударів»; планова заміна за Δp
Сорбент і утилізація, грн/рік	120 000	90 000	30 000	Каскадування касет; контроль точки прориву
ТО/ремонт, грн/рік	100 000	70 000	30 000	Прогнозне ТО за трендами Δp
Простої/брак, грн/рік	200 000	80 000	120 000	Піки усунені; стабільні режими
Ризик-скориговані витрати, грн/рік	90 000	20 000	70 000	Штрафи/скарги/медицині – уникнуті
Σ Річна економія, грн/рік	—	—	325 000	Консервативно
CAPEX, грн	—	—	900 000 (одноразово)	Укриття+фільтри+VFD+SCADA
PP = CAPEX / Σ екон, років	—	—	$\approx 2,77$	< 3 років – прийнятно
NPV (7 років, r = 15%), грн	—	—	$\approx +470\,000$	Стійко додатний

Джерело розрахунок автора

Окремо оцінено відповідність ключовим вимогам, сформульованим у розділі 1. Герметизація вузлів підтверджена димовими тестами (витоків не виявлено), локальні укриття забезпечують цільові швидкості захоплення на крайці, каскадна фільтрація має документально підтверджену ефективність (upstream/downstream-протоколи), ВІВО гарантує відсутність гострих експозицій при заміні. Система моніторингу пройшла калібрування, пороги тривоги вивірені за даними пілоту, сценарії автостарту/блокувань протестовані. Вибухозахист рукавного фільтра та антистатичні вимоги виконано; сухі продувки стисненим повітрям вилучено з практики; прибирання – лише вологе або пилососи з НЕРА. Всі ці елементи в сукупності забезпечують не тільки формальну відповідність нормам, а й створюють експлуатаційно стійкий контур керування ризиком: навіть при коливаннях номенклатури й людського фактору цільові КРІ утримуються з запасом.

Узагальнюючи, пілотні випробування на ділянці АТ «РІАП» довели практичну валідність концепції з розділів 2–3: джерелозорієнтований контроль + каскадна фільтрація + моніторинг «за подіями». $\Sigma(C_i/TDK_i)$ опущено до цільових значень і стабілізовано, піки прибрані, Δp і мінусовий тиск тримаються в межах без «дрейфів», економіка життєвого циклу покращена зі стійкою окупністю, а відповідність технічним і гігієнічним вимогам – підтверджена інструментально та процедурно. Це надає підстави для масштабування рішень з піотної лінії на решту ділянок фасування з очікуваним повторенням ефектів та зниженням ТСО завдяки ефекту масштабу й уніфікації запасних частин/процедур ТО [27].

Висновки до розділу 3.

Концепція модернізації для АТ «РІАП» передбачає герметизацію критичних вузлів і встановлення стандартизованих LEV-укриттів, розділення мережі на «пилову» й «газову» гілки з відповідними швидкісними режимами, каскад «префільтр – рукавний – HEPA (BIBO)» та сорбційний модуль для ЛОС, а також моніторинг із керуванням VFD за гігієнічними індикаторами. Розрахунки повітрообміну, підбір фільтрів і вентиляторів, оцінка гідравлічних опорів і енергоспоживання сформували принципові схеми ПГОС і вимірні інтерфейси. Пілотні випробування підтвердили зниження $\Sigma(\text{Ci/ГДКi})$ до цільових значень, зникнення піків у робзоні, утримання мінусового тиску $\geq 95\%$ часу та високу ефективність каскаду; енергетичний профіт досягнуто завдяки керуванню «за попитом» і оптимальному навантаженню фільтрів.

РОЗДІЛ 4. СТАРТАП - ПРОЄКТ «RIAP CleanPack»

4.1. Інноваційна ідея та ринок застосування

Інноваційна ідея цього проєкту полягає у перетворенні дільниці фасування пестицидів із «традиційної» системи локальних відсмоктувачів і розрізнених фільтрів на стандартизовану, модульну та керовану даними платформу високого контейнменту, яка працює як єдиний техніко-цифровий контур «джерело – перехоплення – каскадна очистка – моніторинг – експлуатаційна економіка». На відміну від існуючої практики точкових модернізацій, що фокусуються лише на збільшенні витяжних витрат або заміні окремого фільтра, запропонована архітектура поєднує герметизацію вузлів і уніфіковані локальні укриття, двоканальну мережу (окрема «пилова» та «газова/ЛОС» гілки з власними швидкісними режимами), трирівневу фільтрацію з безпечною заміною картриджів (BIBO), а також керування за «цільовими гігієнічними змінними» – системі задається не абстрактна витрата повітря, а цільові значення індексу $\Sigma(C_i/\Gamma DK_i)$, перцентилів PM2.5/PM10 та частки часу в межах мінусового тиску; далі автоматика з VFD і балансувальними органами підтримує стан процесу в цих границях. Ключем до новизни є саме зміна «керованої змінної»: система навчається реагувати на фактичні профілі викидів та піки від операцій укупорювання/наливу, а не лише на статичні розрахункові витрати, – завдяки поєднанню онлайн-датчиків ЛОС/PM, ΔP на фільтроелементах, статичних тисків у камері й алгоритмів зворотного зв'язку.

У конструктивному вимірі новизну формують чотири ідеї. Перша – «kit-of-parts»: набір стандартизованих модулів, які можна швидко конфігурувати під будь-яку лінію фасування, не перекроюючи весь цех. До набору входять щілинні кожухи для засипання, бортові відсмоктувачі для дозування, кільцеві насадки для укупорювання, закриті наливні головки з поверненням парів, секційні сорбційні касети (lead/lag) і BIBO-рамки для HEPA/ULPA. Такий

підхід кардинально скорочує час простою на монтаж/переналаштування, зменшує ризик помилок і здешевлює масштабування на інші дільниці. Друга – повний «паспорт вентиляції»: кожен вузол має вимірні ніпелі, контрольні перерізи, місця для датчиків ΔP і швидкості; завдяки цьому налаштування й аудит перетворюються на відтворювані процедури з прозорими цифрами. Третя – «подвійний магістральний принцип»: пил збирається і транспортується окремою гілкою з високими швидкостями (щоб уникнути осідання), а газова (ЛОС) гілка тримається на нижчих швидкостях і направляється на сорбент; це усуває компроміси між вимогами до аеродинаміки твердих часток і оптимумом сорбційних модулів. Четверта – «цифровий близнюк експлуатації»: спрощена модель мережі (опори, ΔP , ефективності ступенів, графік регенерації рукавного) постійно оновлюється вимірними даними – на її основі система прогнозує ресурс фільтроелементів, момент прориву сорбенту, споживання енергії та очікуваний ефект від змін у рецептурі чи графіку виробництва.

Практична спрямованість рішення полягає не лише в досягненні цільових гігієнічних показників у робочій зоні ($\Sigma(C_i/GDK_i) \leq 0,30$ у типовому режимі; відсутність піків понад контрольні рівні; фонові значення РМ після НЕРА; стабільний мінусовий тиск), а й у доведеній керованості експлуатаційних витрат. По-перше, каскад «префільтр – НЕРА – сорбент» у пропонованій компоновці працює на власних оптимумах: рукавний ступінь бере «масу» і тримає помірний ΔP завдяки коректному навантаженню air-to-cloth; НЕРА «полірує» тонкодисперсний хвіст до фону; сорбент відпрацьовує ЛОС без передчасних проривів, оскільки газова гілка очищена від аерозолі. По-друге, VFD і «розумне» балансування дозволяють знизити енерговитрати за рахунок керування за потребою і законів подібності ($Q \sim n$; $\Delta p \sim n^2$; $P \sim n^3$), тоді як жорстке дроселювання на заслінках – відмова від «дорогої стабільності». По-третє, ВІВО-процедури та шафа ТО мінімізують гострі експозиції під час заміни картриджів, що знижує професійні ризики і невиробничі простої. По-четверте, стандартизовані інтерфейси укриттів і швидкозмінні манжети під різні типорозміри тари прибирають «сірі зони» між технологіями та

вентиляційниками – оператор не може фізично працювати «в обхід» витяжки, бо укриття інтегроване у саму операцію.

Новизна ідеї також у тому, що моніторинг перестає бути пасивним «реєстратором фактів», а стає активним виконавчим контуром. Пороги попереджень (warning) і аварій (alarm) для ЛОС/РМ і ДР ув'язуються з конкретними алгоритмами: автоматичний підхват частоти обертання вентилятора, блокування рециркуляції (якщо вона передбачена локально для безпечних зон), рекомендації для оператора на НМІ («закрийте люк/перевірте манжету/увімкніть режим очистки рукавного»), автоматичне створення заявки на ТО. Паралельно формуються «комплаєнс-звіти» з вбудованими QA/QC-маркерами (калібрування, бланки, дублікати), що значно спрощує взаємодію з інспекторами, страховими компаніями та аудитором ESG. Для підприємства це прямо транслюється у менші транзакційні витрати: замість разових кампаній «під перевірку» система зберігає і візуалізує історію роботи, а відхилення ловляться й усуваються до того, як вони перетворяться на інцидент [4].

Цільові сегменти клієнтів для такої платформи ширші за вузький ринок фасування пестицидів, але саме цей ринок є «ядерним». По-перше, це виробники й контрактні фасувальники ЗЗР (порошки, гранули, емульсії, концентрати), які стикаються з одночасною проблемою пилу й ЛОС, жорстким регуляторним тиском і високою чутливістю громадськості до запахів. По-друге, підприємства хімічної та лакофарбової промисловості з аналогічними операціями дозування, змішування, укупорювання, де леткі розчинники й дрібнодисперсні компоненти зустрічаються на одній лінії. По-третє, майданчики насінневого протруювання, де пил активних інгредієнтів і леткі добавки створюють близькі до «пестицидних» профілі ризику й викидів. По-четверте, фармацевтичні та косметичні виробництва класу «нестерильних порошкових форм» – не як пряма ніша, а як джерело практик високого контейнменту; частина модулів (BIBO, HEPA/ULPA, інтерлокінг укриттів) уніфікується з їхніми вимогами. По-п'яте, сегмент середніх і малих підприємств із «змішаними» лініями, що не мають ресурсів на великі

індивідуальні проєкти: для них важливі саме стандартизовані комплекти з коротким терміном установки, готовими інструкціями і зрозумілою окупністю.

Важливі стейкхолдери в межах кожного підприємства – служби охорони праці/екології, технологи ліній, служба вентиляції/КВПіА, керівники виробництва та фінансова функція. Їхні «болі» різняться: ОП/екологія відповідають за $\Sigma(C_i/GDK_i)$, скарги та дозволи; технологи – за продуктивність, повторюваність дозування, зручність доступу до вузлів; вентиляція – за стабільність режимів та обслуговування фільтрів; фінанси – за TCO, PP та NPV. Запропонована платформа говорить «мовою» кожного з них: для ОП/екології – КРІ гігієни та «комплаєнс-звіти», для технологів – укриття, що не заважають роботі й навіть покращують чистоту дозування; для вентиляції – стандартизовані вузли та вимірні точки; для фінансів – прозора енергетика, ресурс фільтрів і прогнозовані CAPEX/OPEX. Це не абстрактний «проєкт раз і назавжди», а інженерний продукт із життєвим циклом, сервісом і оновленнями.

Додатковою інновацією можна вважати «алгоритм керування за індексом ризику». У традиційних системах оператори бачать лише витрати повітря та індикатори «витяжка увімкнена/вимкнена». Тут же на дашборді виводиться інтегральний індекс $\Sigma(C_i/GDK_i)$ у робзоні (онлайн-обчислення на основі сенсорів ЛОС/РМ і параметрів рецептур), перцентилі за зміну і «частка часу в зеленій зоні». Коли індекс підступає до порогу, система спершу м'яко підвищує витяжку, перевіряє мінусовий тиск, пропонує оператору закрити люк або замінити манжету, і тільки потім формує «жорстке» попередження. Цей «людиноцентричний» каскад дій зменшує кількість помилкових тривог і тренує дисципліну: персонал бачить причинно-наслідковий зв'язок і вплив своєї поведінки на індекс.

Трансфер цієї ідеї на ринок супроводжується чіткою продуктовою пропозицією. Базовий пакет включає аудит/карти джерел, розрахункову модель повітрообміну, комплект укриттів (kit-of-parts), каскад фільтрації з BIBO, магістралі з вимірними точками, SCADA/EMS із дашбордами та порогами, програму введення в експлуатацію й навчання. Розширений пакет – підписка на

аналітику: місячні звіти, прогнозний ресурс фільтрів/сорбенту, автоматичні «service tickets», оновлення алгоритмів керування. Сервісно-економічна модель допускає як прямий CAPEX з гарантійним сервісом, так і «очищення як сервіс» (Clean-Air-as-a-Service) – для підприємств, що хочуть розтягнути платежі та отримати гарантовані KPI за угодою рівня сервісу [74].

Щоб зафіксувати практичну корисність для різних споживачів, зведемо карту «цінність → сегмент → вимірний показник». Це дозволяє швидко «приземлити» інноваційну ідею на конкретний завод, обрати релевантні модулі та погодити очікувані результати.

Таблиця 4.1 – Пропозиція цінності × сегменти клієнтів × вимірні показники

Сегмент клієнтів	Ключова цінність для сегмента	Що саме змінюється у процесі	Вимірні KPI/орієнтири приймання
Виробники/фасувальники ЗЗР (ядро)	Стійке зниження ризику й скарг; комплаєнс	Джерелозорієнтований контейнмент + каскад фільтрів	$\Sigma(C_i/GDK_i) \leq 0,30$; P95 РМ/ЛОС нижче CL; 95% часу «мінус»
Лакофарбова/хімічна промисловість	Контроль ЛОС і пилу одночасно	Розділення «пилової» і «газової» гілок, сорбент lead/lag	ЛОС на виході $\leq 10\%$ upstream; РМ після НЕРА $\approx$ фон
Насіннєве протруювання	Зниження пилу активів/запахів	Укриття дозування; кільцеві насадки укупорювання	Піки відсутні; скарги=0; стабільний ΔP
СМЕ з «змішаними» лініями	Швидкий ретрофіт без зупинки виробництва	Kit-of-parts; стандартизовані інтерфейси	Монтаж за «вікно»; окупність <3 роки
Фарма/косметика (суміжні)	Високий контейнмент ВІВО/НЕРА/ULPA	Шафове ТО, верифікація НЕРА, антистатика	Аерозольний leak-test=ОК; нуль гострих експозицій

Джерело розроблено автором

Щоб підкреслити інноваційні елементи, наведемо відповідність «компонент → яку проблему закриває → наскільки це ново відносно практик галузі → як сприймають стейкхолдери». Це допоможе і при внутрішньому захисті проєкту, і при презентаціях партнерам.

Таблиця 4.2 – Інноваційні компоненти × розв’язувана проблема × новизна
× користь стейкхолдерам

Компонент/рішення	Яку проблему закриває	Що нового vs. типові рішення	Користь для стейкхолдерів
Kit-of-parts для укріплень	Довгий/дорогий ретрофіт, «сірі зони»	Уніфіковані модулі, швидкозмінні манжети	Технолог: менше простоїв; Вент: легше налаштувати
Подвійна магістраль (пил/газ)	Компроміс пил/ЛОС, забиття сорбенту	Окремі режими швидкості/Δр, окремі ступені	Еколог: стабільні ЛОС; Фінанси: ресурс сорбенту ↑
Каскад префільтр–НЕРА–сорбент (ВІВО)	Піки, гострі експозиції при ТО	ВІВО + leak-test як стандарт	ОП: безпечна заміна; QA: протоколи приймання
Керування за Σ(Ci/ГДКi) і перцентилями	Формальний контроль «по витратах»	Цільові гігієнічні метрики в контурі керування	Керівництво: КРІ зрозумілі; аудит: комплаєнс-звіти
Цифровий близнюк експлуатації	Непередбачуваний ресурс фільтрів/сорбенту	Прогноз ресурсу, енергії, тригер ТО	КВПіА: планове ТО; Фінанси: ТСО прозорий
SCADA/EMS з рецептами дій	«Німі» тривоги, людський фактор	Сценарії auto-start/abort/сервісні тікети	Оператор: підказки; Менеджер: прозора історія

Джерело розроблено автором

У ширшому контексті інноваційна ідея відповідає на три макротренди. Перший – регуляторна еволюція: зростають вимоги до повітря робочої зони й викидів на межі майданчика; аудити стають частішими та цифровішими, і підприємствам потрібен не «гарний фільтр», а доказова система. Другий – ESG та страхування: фінансові інституції та страховики враховують виробничі ризики і «зелені» практики при вартості капіталу і полісів; предиктивні дані зменшують премії й підвищують інвестиційну привабливість. Третій – дефіцит кваліфікованого персоналу: стандартизовані модулі, рецепти дій та дистанційний нагляд компенсують нестачу досвіду і роблять систему «самоінструктуючою». У такій рамці платформа, апробована на АТ «РІАП», трансформується з локального проекту в масштабований продукт для суміжних

ринків, а підприємство стає демонстраційним майданчиком для партнерів і клієнтів.

Отже, інновація – це не один «хитрий фільтр», а логічно пов'язана система, де кожен вузол має операційний сенс і цифрове підтвердження, а економіка життєвого циклу прогнозована. Практична спрямованість полягає в тому, що рішення дає миттєву користь (усунення піків, стабільний «мінус», чистіша робзона) і довгострокову стабільність (менше енергії, передбачуваний ресурс, менше інцидентів). Цільові клієнти отримують саме те, що їм потрібно у своїх координатах: технолог – керованість і чистоту процесу, ОП/еколог – цифри для норм і звітів, KBПiA – вимірність та сервісопридатність, фінанси – коротку окупність і позитивний NPV. Ідея народилася з реальних потреб дільниці фасування пестицидів і доведена пілотом; її сила – у можливості бути відтвореною «з коробки» на інших майданчиках із передбачуваним результатом [69].

4.2. Аналіз ринку і конкурентного середовища

Ринок сформований поєднанням регуляторного тиску на якість повітря робочої зони і викиди, очікувань стейкхолдерів щодо мінімізації запахів на периметрі, переходом підприємств до цифрової звітності за екологічними показниками, а також операційною потребою знизити нерегламентовані простої, пов'язані з «піками» на операціях укупорювання, наливу та розкривання мішків. Умовно виділяються чотири кластери клієнтів: великі виробники ЗЗР із повним циклом (які мають декілька ліній і прагнуть уніфікувати рішення по майданчику), контрактні фасувальники та дрібні виробники (яким важлива швидка окупність і короткий монтаж без тривалої зупинки), підприємства суміжних галузей зі «змішаними» лініями (лакофарбові, агросировинні, насіннєве протруювання) і «високі» вимоги фарма-класу для нестерильних порошкових форм (де пріоритет – ВІВО, тест на витоки HEPA та відтворюваність процедур). У кожному кластері ключовий драйвер попиту – не

«абстрактна чистота», а вимірна керованість ризику: зменшення $\Sigma(C_i/GDK_i)$, відсутність піків, стабільний мінусовий тиск і документована ефективність каскаду фільтрації. Саме тому рішення, що поєднує модульні укриття, двоканальну мережу для пилу і ЛОС, каскад «префільтр – HEPA – сорбент» та моніторинг з алгоритмами дій, адресує потреби безпосередньо мовою KPI.

Конкурентне поле складається з кількох типів гравців. Перший тип – постачальники компонентів світового рівня: фільтроелементи, касети HEPA/ULPA, сорбенти, рукавні корпуси, вентилятори, VFD, датчики ΔP і потоку. Їхня сильна сторона – якість і сертифікація, слабка – відсутність інтегрованої відповідальності за «весь процес». Другий тип – локальні інтегратори вентиляції, що пропонують каналні мережі, підбір вентиляторів і монтаж. Вони швидкі, часто конкурентні за ціною, але рідко беруть на себе гарантію за гігієнічний результат у робочій зоні та не завжди мають практики VIBO або фарма-контейнменту. Третій тип – «нишеві» постачальники фарма-рішень із високим контейнментом: їхні продукти чудово закривають безпеку TO і HEPA-контроль, але цінник і надмірна «стерильність» можуть бути необґрунтованими для агрохімії. Четвертий тип – постачальники «моніторинг як сервіс», які надають датчики ЛОС/PM і дашборди, однак не мають важеля впливу на сам повітряний контур і фільтрацію. П'ятий тип – виробники «комплектних станцій» локальної витяжки з фіксованою конфігурацією; вони прості у впровадженні, але не покривають масштаб ліній і не вирішують завдання балансування мінусового тиску та каскадної очистки.

Практичні сценарії закупівель показують, що у більшості проектів клієнт змушений «шити» рішення з кількох постачальників: окремо укриття, окремо фільтрація, окремо автоматика, окремо датчики. Ризики при такій сегментації – розмитість відповідальності, конфлікти у вимогах до швидкостей і Δp , відсутність єдиної методики приймальних випробувань (upstream/downstream, leak-test HEPA, точка прориву сорбенту), неможливість гарантувати $\Sigma(C_i/GDK_i)$ у типових режимах. Тому інтегрована пропозиція з «єдиним KPI-контрактом» –

об'єктивна ніша, яку нині закривають або великі ЕРС-контракти (дорого/довго), або одиничні «системні інтегратори» з власною методологією.

Унікальна ціннісна пропозиція платформи, апробованої на АТ «РІАП», полягає в тому, що вона поєднує в одному рішенні дев'ять ключових елементів, кожен із яких «замкнений» на вимірні метрики. По-перше, герметизація і kit-of-parts укриттів – швидка адаптація під різні типорозміри тари і операції. По-друге, двоканальна мережа «пилова/газова» – різні швидкості і Δp , жодних компромісів між сорбентом та аеродинамікою частинок. По-третє, каскад «префільтр – рукавний/НЕРА – сорбент» у ВІВО – безпечна заміна і документована ефективність. По-четверте, керування за гігієнічними метриками: система не просто підтримує витрати, а тримає $\Sigma(Ci/ГДKi)$, перцентилі РМ/ЛОС і мінусовий тиск у цільовому вікні з VFD-алгоритмами. По-п'яте, SCADA/EMS з «рецептами дій» і автоматичними сервісними тікетами – від «німого» моніторингу до керованого контуру. По-шосте, цифровий близнюк експлуатації – прогноз ресурсу НЕРА/сорбенту, енергоспоживання та моментів ТО. По-сьоме, «комплаєнс-пакет» приймальних випробувань: upstream/downstream-протоколи, leak-test, точка прориву, контроль Δp і статичних тисків, контрольні карти. По-восьме, сервісна модель SLA із визначеними KPI та відповідальністю «до результату». По-дев'яте, економіка життєвого циклу: прозора окупність, TCO із ризик-корекцією, сценарії «енергетичної оптимізації».

Щоб системно порівняти конкурентів і нашу позицію, доцільно використати матрицю «тип гравця × спроможність». Наведені оцінки відображають типові сильні/слабкі сторони за проектами у сфері фасування та суміжних галузях і слугують інструментом для аргументації перед закупівельниками й технічними радами [39].

Таблиця 4.3 – Порівняльна матриця спроможностей на ринку

Тип гравця / Критерій	Герметизація/укриття	Каскадна фільтрація (ВІВО)	Двоканальна мережа (пил/газ)	Моніторинг керування	Гарантія КРІ (Σ, Р95, «мінус»)	Термін/інтервенції
Постійн. постачальник компонентів	Ні/обмежено	Так (модулі)	Ні	Ні	Ні	Короткий (частини)
Локальний інтегратор вентиляції	Частково	Частково	Рідко	Частково	Рідко	Середній
Нишевий фармацевтичний контейнер	Так	Так (ВІВО, НЕРА/ULPA)	Частково	Частково	Так (але дорого)	Довгий
Моніторинг як сервіс	Ні	Ні	Ні	Так	Ні	Короткий
«Комплексні» станції витяжки	Так (локально)	Ні/частково	Ні	Ні	Ні	Дуже короткий
Інтегрована платформа (наш підхід)	Так (kit-of-parts)	Так (каскад + ВІВО)	Так	Так (SCADA→VFD)	Так (договірні КРІ)	Оптимізований

Джерело розроблено автором

Ціннісна пропозиція має бути конкретизована «мовою» кожного стейкхолдера та сегмента. Для цього використовується карта «роль/сегмент → що болить → що отримує → як міряти». У підсумку під час презентацій рішення звучить не загальними тезами, а точними формулами прийнятності: « $\Sigma(C_i/GDK_i) \leq 0,30$ », «P95 ЛОС/РМ нижче CL», «95% часу стабільний мінусовий тиск», «PP < 3 років», «NPV > 0 за 7 років», «0 гострих експозицій на ТО (ВІВО)».

Таблиця 4.4 – Карта цінності для стейкхолдерів і сегменті

Роль/сегмент	Біль/ризик	Рішення/елемент платформи	Міра успіху/KPI
Охорона праці/екологія	$\Sigma > 1$, піки, скарги на запахи	Укриття+каскад+SCADA, керування за Σ	$\Sigma \leq 0,30$; $P95 < CL$; 0 скарг; 95% часу «мінус»
Технолог лінії	Розсип/розлив, повторюваність дозування	Манжети/ізолятори, щільні/кільцеві насадки	0 позапланових зупинок; стабільність дозування
КВПіА/вентиляція	Налаштування/аудит без вимірних точок	Ніпелі, ΔP , статичні тиски, цифровий близнюк	Час налаштування $\downarrow \times 2$; прогноз ресурсу НЕРА/собенту
Фінанси/менеджмент	Непрозорий ТСО/ризик штрафів	SLA за KPI; CAaaS/або CAPEX + сервіс	PP < 3 роки; NPV > 0; річна економія > заданого порогу
Контрактні фасувальники (SME)	Немає «вікна» для монтажу	Kit-of-parts, швидкокомонтаж	Монтаж за «вікно»; запуск у термін; окупність < 3 роки

Джерело розроблено автором

Підсумовуючи аналіз ринку, інтегрована платформа очищення і контейнменту «під KPI» закриває реальну прогалину між компонентою (фільтри/вентилятори/датчики) і результатом (передбачувана гігієна, безпека, економіка). Демонстраційний майданчик АТ «РІАП» є доказом працездатності та дає маркетинговий актив: референс-лінію з вимірними «до/після» і доступом для потенційних клієнтів. Це зміцнює позицію у тендерах, де досвід впровадження з вимірними KPI часто важливіший за мінімальну ціну, і формує базу для масштабування через партнерства з OEM-пакувальниками, інтеграторами та сервісними компаніями [27].

4.3. Ресурсозабезпечення і дорожня карта впровадження

Модель реалізації спирається на принцип «єдиного вікна»: одна відповідальна команда веде інженерію, постачання, монтаж, пусконаладження, приймальні випробування й передачу в експлуатацію з наступним сервісом за SLA. Для цього формується кросфункціональна матриця компетенцій: процесний інженер (власник технології фасування), інженер з вентиляції та аеродинаміки (повітрообмін, гідравліка, Δp), спеціаліст із фільтрації (рукавні/HEPA/сорбент), конструктор укриттів (kit-of-parts, герметизація, антистатика), КВПіА/SCADA (датчики, дашборди, рецепти дій), лаборант-аналітик (методики відбору/аналізу РМ/ЛОС/формальдегіду), фахівець із охорони праці та вибухозахисту, керівник монтажу і пусконаладження, сервісний менеджер. На стороні замовника визначаються власники процесів: технолог лінії, відповідальний за вентиляцію/енергетику, ОП/екологія, ІТ (для інтеграції SCADA/EMS) і фінанси (контроль CAPEX/OPEX і TCO).

Матеріально-технічне забезпечення включає комплект укриттів (щільніні кожухи, бортові відсмоктувачі, кільцеві насадки, закриті наливні головки), повітропроводи та фасонні частини (антистатичні/заземлені), рукавний фільтр із PTFE-мембраною, модулі HEPA у VIBO-рамі, сорбційні касети з активованим вугіллям (lead/lag), вентилятори з VFD (відповідний клас захисту), шумоглушники, дефлектори. Для інструментального контуру: датчики Δp на кожному ступені, манометри статичних тисків у камері, вимірники швидкості у критичних перерізах, онлайн-датчики ЛОС і РМ, первинний калібратор витрат для насосів, еталонні гази/аерозоль для калібрування, пробовідбірні зонди для ізокінетики. Документаційний пакет охоплює ПВР (проект виконання робіт), ПБ (план безпеки), ПЛАС/ПЛХ (алгоритми реагування), методики IQ/OQ/PQ та форми приймальних протоколів [54].

Дорожня карта впровадження структурована на сім етапів із чіткими гейтами рішення. Етап 0 – передпроектний аудит і базова валідація: карта джерел, первинні вимірювання РМ/ЛОС, манометрія, швидкості захоплення, узгодження цільових КРІ ($\Sigma(\text{Ci/ГДKi})$, P95, частка часу «мінуса»). Етап 1 – інженерія і специфікації: розрахунок повітрообміну, бюджет опорів, підбір фільтроелементів/вентиляторів, компоновка укриттів, схема SCADA/EMS, специфікація сенсорів і порогів. Етап 2 – постачання і виготовлення: закупівля стандартних вузлів, виготовлення нестандартних кожухів/рам, підготовка ВІВО-касет, виготовлення щитів керування, FAT тест для SCADA. Етап 3 – монтаж і міжопераційні перевірки: розмітка трас, монтаж укриттів, повітропроводів, фільтрів, вентиляторів, кабелювання датчиків, перевірка герметичності (димогенератор), електровипробування, попереднє балансування. Етап 4 – пусконаладження і IQ/OQ: вивірення VFD-алгоритмів, зшивання датчиків із дашбордами, тести тривоги/сценаріїв, leak-test HEPA, перевірка ВІВО-процедур, пробні цикли з порогоми. Етап 5 – PQ і приймання: upstream/downstream-вимірювання ефективності, ізокінетика у каналах, контроль точки прориву сорбенту, перевірка досягнення КРІ у типових режимах і пікових операціях, оформлення актів. Етап 6 – експлуатація і сервіс: щомісячні огляди, квартальні «повні» вимірювання, контрольні карти ΔP і мінусового тиску, прогноз ресурсу HEPA/сорбенту, планові заміни, навчання та перевірка знань персоналу з оновленням СОП.

Щоби план був керованим, використовують календар із завантаженням ключових ролей і чіткими артефактами на кожному кроці. Такий календар синхронізують із виробничим графіком, щоб монтаж у «гарячих» зонах виконувати у вікна простою, а пусконаладження – поетапно, не блокуючи випуск продукції.

Таблиця 4.5 – Дорожня карта впровадження і контрольні артефакти

Етап (тижні)	Ключові роботи	Вихідні артефакти/гейти	Відповідальні ролі (RACI)
0. Аудит (1–2)	Карта джерел, базові заміри РМ/ЛОС, манометрія	ТЗ, цільові KPI, план вимірювань	Р: Процес/Вент; А: РМ; С: ОП, Техн.; І: Фін.
1. Інженерія (3–4)	Розрахунки Q/Δр, підбір фільтрів/вентиляторів, SCADA	Комплект креслень/специфікацій, ПВР	Р: Вент/КВПіА; А: Процес; С: ОП; І: Монтаж

Продовження табл. 4.5

2. Постачання (5–8)	Закупівлі, виготовлення кожухів/ВІВО, щити керування	Готовність устаткування, FAT SCADA	Р: Закуп.; А: Процес; С: Вент/КВПіА; І: Сервіс
3. Монтаж (9–12)	Монтаж укриттів, трас, фільтрів, вентиляторів, сенсорів	Акти прихованих робіт, герметичність	Р: Монтаж; А: Вент; С: ОП/Безп.; І: Техн.
4. ПНР, IQ/OQ (13–14)	Балансування, VFD, тривоги, leak-test НЕРА, ВІВО-практика	Протоколи IQ/OQ, протоколи тривоги	Р: КВПіА; А: Вент; С: ОП/Лаб; І: IT
5. РQ/Приймання (15)	Up/Down, ізокінетика, точка прориву, KPI у режимах	Акт приймання, звіт «до/після», СОП	Р: Лаб; А: Процес; С: ОП/Фін.; І: Менеджмент
6. Експлуатація (16+)	Сервіс, огляди, навчання, контрольні карти, звітність	SLA, графіки замінів, дайджести трендів	Р: Сервіс; А: ОП; С: Вент/КВПіА; І: Техн./Фін.

Джерело розроблено автором

Навчання персоналу і сервіс – така ж критична частина, як і саме обладнання. Навчання поділяють на базове (оператори лінії, наладчики), поглиблене (КВПіА/SCADA, вентиляція) і спеціалізоване (ВІВО, leak-test НЕРА, ізокінетика). Форми – змішаний формат: короткі модулі у цеху з демонстраціями, відеоінструкції, настінні «шпаргалки» біля укриттів, іспит-опитник з фіксацією результатів. Періодичність – первинне під час IQ/OQ і щорічне повторне; позапланово – після інцидентів або змін у СОП. Сервісна модель описується SLA з часом реакції, переліком планових робіт, переліком критичних запасних частин (НЕРА-касети, рукавні мішки, сорбент, датчики Δр, манометри, привід VFD). Інструментарій сервісу – контрольні карти Δр на кожному ступені, журнали статичних тисків, перелік «червоних прапорців»

(втрата мінусового тиску, зростання P95 ЛОС/PM, швидка деградація ΔP , часті тривоги по leak-test), а також інтеграція SCADA з системою сервісних тікетів.

Щоб закріпити ритм навчання і регулярних робіт, формується календар на перший рік експлуатації. Він зручний для керівників змін і відображає, хто, коли і що саме робить, які контрольні цифри збираються й як приймається рішення про заміну фільтроелементів чи сорбенту.

Таблиця 4.6 – Календар навчання і сервісних активностей (перший рік)

Період/квартал	Навчання/атестація	Сервіс/контрольні дії	Дані/рішення
Місяць 1 (після PQ)	Базове для операторів; ВІВО-практикум; SCADA-огляд	Перевірка ΔP «нульових», пороги тривоги, огляд укриттів	Підтвердження KPI; затвердження контрольних карт
Місяці 2–3	Настінні брифінги (10 хв/змін)	Щомісячні огляди; чистка рукавного; аналіз трендів	Корекція порогів; незначні балансувальні підстроювання
Квартал 2	Поглиблене KBПiA/ізокінетика	Квартальні «повні» вимірювання; leak-test HEPA	Рішення щодо заміни HEPA/рукавів; оновлення СОП
Квартал 3	Повторна атестація операторів	Огляд сорбенту; тест «точки прориву»; ΔP аналіз	Ротація касет (lead→lag); закупівля запасу
Квартал 4	Узагальнюючий тренінг + іспит	Річний аудит: KPI, TCO/PP/NPV, план на наступний рік	Річний звіт; ревізія SLA; план модернізацій

Джерело розроблено автором

Ресурсні ризики й обмеження проєкту керуються планом запобіжних дій. До критичних ризиків належать затримки постачання ВІВО-рам або HEPA-касет, конфлікти трас із існуючими комунікаціями, необхідність зупинки лінії довше, ніж «вікно»; також людський фактор – відхилення від СОП під час пікового навантаження. Пом'якшення включає попереднє резервування критичних вузлів, 3D-скан або детальне трасування для уникнення колізій, поетапний монтаж із тимчасовими байпасами, «пробний день» перед PQ з моделями відмов і відпрацюванням сценаріїв, а також розклад «тіньового» наставництва для нових операторів протягом перших змін після запуску. На стороні сервісу – мінімальний склад запчастин на місці (1 комплект HEPA, 1

комплект рукавів, 30–50% запас сорбенту), договір на пріоритетне постачання, і «живий» список уроків (Lessons Learned), який оновлюється після кожного інциденту або відхилення [42].

Економічно дорожня карта інтегрується в модель ТСО: на етапі інженерії фінансова функція отримує прогноз CAPEX/OPEX, на етапі постачання – контроль фактичних кошторисів, на етапі PQ – актуалізацію енергоспоживання, ресурсу фільтроелементів і графіків замін, на етапі експлуатації – щоквартальні дайджести економії й ризик-скоригованих витрат. Це дозволяє тримати окупність у заявленому коридорі та вчасно робити коригувальні інвестиції (наприклад, додати секцію сорбенту або збільшити площу фільтрації для зниження ΔP).

Таким чином, ресурсне забезпечення і дорожня карта впровадження перетворюють концепцію на керований проект із прогнозованим результатом. Чітко визначені ролі, матеріали та інструменти, контрольні гейти й артефакти, навчання і сервісна дисципліна забезпечують не одноразове «поліпшення», а стійкий контур «плануй – впроваджуй – перевіряй – вдосконалюй». Для АТ «РІАП» це означає, що референсна лінія, яка демонструє гігієнічний та економічний ефект, може бути масштабована на суміжні дільниці та підприємства зі збереженням календаря, кошторисної точності і відповідальності за кінцевий KPI [9].

4.4. Бізнес- та фінансова модель проєкту з оцінки ризиків та ефективності впровадження

Запропонована комерціалізація рішення, яке апробоване на дільниці АТ «Київський завод “РІАП”», спирається на гібридну модель «обладнання + сервіс + дані». Ядро – поставка модульного комплексу високого контейнменту для фасування пестицидів (kit-of-parts укриттів, двоканальна мережа “пил/газ”, каскад «префільтр–HEPA–сорбент» у BIBO, вентилятори з VFD, SCADA/EMS).

Поверх обладнання – сервіс за SLA (планові огляди, калібрування, leak-test HEPA, прогнозний ресурс фільтроелементів), підписка на аналітику та «керування за KPI» (дашборди, сповіщення, автоматичні сервісні тікети), а також регулярні поставки витратників (рукавні мішки/касети, HEPA-картриджі, сорбент). Для підприємств, яким критичний CAPEX, пропонується «Clean-Air-as-a-Service» (CAaaS): щомісячна плата за гарантовані гігієнічні KPI з правом викупу. Модель цінності для клієнта закріплюється вимірними результатами: $\Sigma(Ci/ГДKi)$ у робзоні $\leq 0,30$, P95 для РМ/ЛОС нижче контрольних рівнів, мінусовий тиск $\geq 95\%$ часу, доведена ефективність каскаду upstream/downstream, окупність < 3 років за рахунок енергетичних, сервісних та ризик-скоригованих вигод.

Канали збуту комбінують прямі індустріальні продажі (великі агрохімічні підприємства та контрактні фасувальники), партнерські інтеграції з локальними вентиляційними компаніями (які беруть на себе монтаж і частину сервісу), OEM-партнерства з виробниками фасувальних ліній (вбудована опція «High-Containment Package») та дистрибуцію через технічних дилерів для СМБ (стандартизовані комплекти під типові витрати повітря). Демонстраційний майданчик на «РІАП» виконує роль референсу: формує довіру у закупівельних комітетів, скорочує цикл прийняття рішення та відкриває можливість пілотів «під ключ». Для зовнішніх ринків (країни ЄС та сусідні) каналову стратегію посилюють угоди з міжнародними постачальниками HEPA/VIBO, вентиляторів і сорбентів, що зменшує логістичні ризики та прискорює локалізацію. Маркетинг ґрунтується на доказовості: звіти «до/після», контрольні карти ΔP , upstream/downstream-протоколи, відео випробувань, стандартизовані СОП, – усе це є «мовою» технічних рад і аудиторів клієнтів.

Партнерська екосистема будується навколо відповідальності «до результату». Технічні партнери – виробники HEPA/ULPA у форматі VIBO, постачальники PTFE-рукавів і корпусів рукавних фільтрів, виробники вентиляторів з VFD (IE3/IE4), постачальники активованого вугілля (в т.ч. імпрегнованого) та виробники датчиків ΔP /швидкості/ЛОС/РМ. Інтеграційні

партнери – монтажні організації вентиляції, КВПіА-інтегратори (SCADA/EMS), лабораторії для HPLC/GC та ізокінетики. Сервісні – калібрувальні центри, підрядники leak-test HEPA, логісти та утилізатори відпрацьованих фільтрів/сорбенту. Комерційні – OEM фасувальних машин (пакет «Clean Air Ready»), страхові та лізингові партнери (CAaaS/Leasing). Кожен партнер отримує чіткі ролі, KPI та частку в маржі; у договорах закріплюються сервісні рівні, запаси критичних комплектуючих та терміни реакції.

Структура доходів концентрується навколо трьох потоків. Перший – продаж обладнання (CAPEX): маржинальність 25–35% завдяки модульності та стандартизованому виробництву. Другий – сервіс/SLA та підписки на аналітику (ARR 12–18% від CAPEX на рік): планові огляди, калібрування, leak-test, оновлення алгоритмів, дистанційна аналітика трендів $\Delta P/\Sigma(Ci/ГДKi)$. Третій – витратні матеріали: HEPA-касети, рукавні мішки/касети, сорбент і засоби герметизації з валовою маржею 20–30%. Додатково – навчальні модулі та аудит виробничих ліній (пакети IQ/OQ/PQ), інтеграції з ERP/ESG-звітністю клієнта, консультації під розширення виробництва. У CAaaS-моделі валовий дохід формується щомісячною платою за «чисте повітря з KPI» (залежно від витрат повітря/навантаження) з мінімальним строком 36 місяців і опцією викупу.

Структура витрат охоплює COGS обладнання (фільтрокорпуси, HEPA/BIBO, рукави, вентилятори/VFD, сорбент, датчики, повітропроводи, щити керування), монтаж/налагодження (роботи і витратні матеріали), логістику та митні платежі, гарантійний резерв, сервісну команду (зарплата, виїзди, калібрування), R&D (оновлення алгоритмів керування, нові укриття/картриджі), продажі/маркетинг (пре-сейлз, пілоти, референс-відео), адміністративні витрати (ІТ-інфраструктура, страхування, юридичний супровід). У CAaaS додається компонент фінансування обладнання (вартість капіталу) та управління оборотним капіталом (запаси фільтроелементів, дебіторка) [7].

Таблиця 4.7 – Канали збуту × сценарії застосування × ключові умови

Канал	Кому/коли підходить	Ключова пропозиція	Умови/SLAs і маржа
Прямі індустріальні продажі	Заводи з 2–5+ лініями	Проект «під ключ», гарантія KPI	CAPEX; сервіс 12–18%/рік; маржа 25–35%
Партнери-інтегратори вентиляції	Регіональні монтажні компанії	Спільні тендери; навчання; ко-бренд сервісу	Поділ маржі; квоти на SLA
ОЕМ фасувальних ліній	Нові лінії/модернізації	Пакет «High-Containment» у поставці OEM	Ліцензія/роялті; інтегр. випробування
Дилери СМБ	Малі фасувальники/Контрактники	Стандартизовані комплекти швидкого монтажу	Короткий цикл; спрощені KPI; сервіс-фонд
CAaaS	Клієнти з обмеженим CAPEX, підконтрольність KPI	Щомісячна плата за KPI + викуп	Договір 36 міс.; заставний пакет

Джерело розроблено автором

Таблиця 4.8 – Партнерська екосистема (ролі, внесок, взаємні KPI)

Партнер/тип	Роль у рішенні	Що отримує	Наші/спільні KPI
HEPA/VIBO виробник	Касети, рамки, leak-test методики	Обсяг/дилерські умови	0 витоків; ΔP у паспорті; термін постачання
Рукавні/фільтр корпус	Рукава PTFE, корпуси рукавних фільтрів	Лінійка «під нас»	АТС/ΔP відповідність; ресурс; гарантія
Вентилятори/VFD	Вентилятори, приводи	ОЕМ-опції; спільний маркетинг	ККД; шум; сервісність; запас на складі
Сорбент (актив. вугілля)	Касети, імпрегнації	Базове замовлення/річні квоти	Час до прориву; Δp; стабільність поставок
Інтегратор SCADA/EMS	Дашборди, тривоги, HMI	ARR; авторські оновлення	Uptime; SLA тривоги; кібербезпека
Монтаж/КВПіА	Установка, калібрування	Роботи + сервіс	«Он-тайм»; IQ/OQ без дефектів

Джерело розроблено автором

Фінансова модель складається з базового та чутливого сценаріїв. У базі береться середня лінія з CAPEX ~0,9–1,2 млн грн, валова маржа обладнання

30%, приєднання на сервіс 75% клієнтів (SLA 15% від CAPEX/рік), витратники 1–2 оновлення на рік. У перший рік передбачається 10 впроваджень (зокрема одна референс-лінія), у другий – 20, у третій – 35 (частка SaaS 10→25%). Операційні витрати ростуть повільніше за виручку завдяки стандартизації й партнерствам. Ключові припущення: середній термін монтажу 3–4 тижні, цикл інкасації 45–60 днів (CAPEX), ARR передплат інкасується щоквартально. Нижче наведено скорочений P&L із ілюстративними значеннями (для орієнтування; у договорах фіксуються фактичні) [65].

Таблиця 4.9 – Скорочена фінансова модель (ілюстративно), тис. грн

Показник	Рік 1	Рік 2	Рік 3	Коментар
Виручка обладнання (CAPEX)	10 500	22 000	42 000	10/20/35 ліній; середній чек 1,05 млн
Валова маржа обладнання (30%)	3 150	6 600	12 600	Стандартизована збірка
Виручка сервіс/аналітика (ARR)	1 100	3 000	6 300	75% attach; 15% CAPEX/рік
Маржа сервісу (40–50%)	550	1 350	3 150	Ефект масштабу
Виручка витратників	1 200	2 500	4 800	НЕРА/рукави/сорбент
Маржа витратників (25%)	300	625	1 200	Оптимізація логістики
Операційні витрати (OPEX)	3 600	5 200	7 200	Продажі, сервіс, R&D, G&A
Операційний результат (EBITDA)	400–600	3 375	9 750	Без урахування амортизації/податків
Інвест. у оборотний капітал	800	1 000	1 500	Запаси/дебіторка
Вільний грошовий потік (≈)	–	2 200	8 000	За відрахуванням OPEX та WC

Джерело розроблено автором

Щоб відчувати чутливість, корисно подивитись, як змінюються прибутковість і терміни досягнення беззбитковості при коливаннях кількості впроваджень, валової маржі та частки приєднання на сервіс. У межах операційної моделі найбільший вплив мають обсяг продажів і attach-rate сервісу – ARR створює «подушку» на випадок сезонності CAPEX і підвищує мультиплікатори оцінки бізнесу.

Таблиця 4.10 – Аналіз чутливості (Δ до бази)

Змінний параметр	Сценарій	Δ EBITDA Рік 3	Коментар
Кількість впроваджень	-20% / +20%	-25% / +27%	Прямий ефект на виручку CAPEX
Валова маржа обладнання	28% / 32%	-9% / +9%	Вплив стандартизації/закупівель
Attach-rate servisu	60% / 90%	-12% / +15%	ARR частково декорелює сезонність
Частка CAaaS	5% / 30%	-3% / +5%	Залежно від вартості капіталу
Ціна сорбенту/НЕРА	+15%	-4%	Компенсується частково через ціноутворення

Джерело розроблено автором

Ризики і заходи пом'якшення структуровано у «реєстр ризиків». Технічні ризики: помилки балансування, витоки в НЕРА-рамі, швидка деградація ΔР на рукавному, передчасний прорив сорбенту – знімаються протоколами IQ/OQ/PQ, leak-test і онлайн-моніторингом з порогами дій. Ланцюжок постачання: довгі терміни для НЕРА/VIVO, імпорتنі сорбенти, спеціальні VFD – зменшуються через рамкові угоди, буферний склад критичних вузлів і альтернативних постачальників. Комерційні: інерція клієнтів та ціновий тиск у тендерах – долаються референс-майданчиком, KPI-контрактами та варіантом CAaaS. Регуляторні: зміни норм, посилення вимог – розв'язуються «комплаєнс-пакетом» і регулярним оновленням методик. Фінансові: валютні коливання, вартість капіталу для CAaaS – хеджуванням, прив'язкою цін, лізинг-партнерствами. Операційні: дефіцит кадрів, помилки при монтажі – стандартизованими СОП, навчанням, атестацією партнерів та перевітками «чотирьох очей».

Таблиця 4.11 – Реєстр ризиків і дій (витяг)

Ризик	Ймовірн.	Вплив	D×I	Запобігання/дії	Індикатори раннього виявлення
Витоки НЕРА (ущільнення)	Середня	Висок.	9	BIBO-рама, leak-test, подвійні ущільнення	Підвищ. РМ після НЕРА; ΔР аномалії
ΔР рукавного росте швидко	Середня	Серед.	6	Оптимізація АТС; імпульси; контроль пилонавантаж.	Дрейф ΔР; частота регенерацій
Прорив сорбенту ранній	Низька	Висок.	6	Lead/lag каскад; онлайн PID; графік замін	ЛОС на виході > 10–20% upstream
Затримка НЕРА/BIBO	Середня	Висок.	9	Рамкові контракти; буферний склад; 2 постачальн.	SLA постачальників; дні в дорозі
Валютний ризик	Середня	Серед.	6	Хедж; індексація цін; локалізація частини COGS	Індекс UAH/EUR; маржа по партіях
Кадровий дефіцит	Середня	Серед.	6	Навчання/сертифікація; SOP; «тіньове» наставн.	Брак сертифікованих бригад; дефекти OQ

Джерело розроблено автором

Показники ефективності впровадження для клієнта та для бізнесу визначені однаково чітко. Операційно-гігієнічні KPI: $\Sigma(C_i/GDK_i) \leq 0,30$ (середнє за зміну), P95 для РМ/ЛОС нижче контрольних рівнів, мінусовий тиск $\geq 95\%$ часу, ефективність НЕРА $\geq 99\%$ і відсутність піків при ТО (BIBO). Виробничі KPI: скорочення аварійних зупинок $\geq 50\%$, стабілізація дозування/укупорювання (менше браку й переробок), час налаштування вентиляції після сервісу $\downarrow \times 2$. Економічні KPI: річна економія (енергія+сервіс+ризик) ≥ 300 тис. грн на лінію, PP < 3 років, позитивний NPV на 5–7 роках за r=12–15%. Бізнес-KPI провайдера: ARR/клієнта $\geq 12\%$ CAPEX, attach-rate сервісу $\geq 70\%$, валова маржа обладнання $\geq 28\%$, чистий утримуваний показник (NET retention) $\geq 110\%$ завдяки апселам витратників/аналітики, «он-тайм» IQ/OQ/PQ $\geq 95\%$ [26].

Таблиця 4.12 – KPI впровадження (клієнт) і бізнес-KPI (провайдер)

Група KPI	Метрика	Орієнтир/порог	Як міряємо
Гігієна	$\Sigma(\text{Ci/ГДКі})$ (серед./P95)	$\leq 0,30 / < 0,50$	Онлайн + квартальні повні вимірювання
	P95 PM/ЛОС	$< \text{CL}$	Дашборди SCADA/EMS
	Мінусовий тиск у камері	$\geq 95\%$ часу у межах	Манометрія/лог SCADA
Фільтрація	η HEPA	$\geq 99\%$	Up/Downstream; leak-test
Операції	Аварійні зупинки	-50% від бази	Журнали простоїв
Економіка клієнта	Річна економія; PP; NPV	≥ 300 тис.; < 3 р.; > 0	ТСО-звіт; сенситив-аналіз
Бізнес провайдера	ARR/attach; валова маржа; NET retention	$\geq 12\%$; $\geq 70\%$; $\geq 110\%$	CRM/ERP; когорти
Якість впроваджень	«Он-тайм» IQ/OQ/PQ	$\geq 95\%$	Приймальні протоколи

Джерело розроблено автором

Пропозиції інвестору виходять із двох релевантних моделей росту – проектної (CAPEX-фокус) і підписочної (SAaaS). У першій – швидке нарощування встановленої бази, що генерує повторювану виручку від сервісу та витратників; у другій – вищі мультиплікатори завдяки ARR, але необхідність у фінансуванні обладнання. Раціональний мікс: почати з CAPEX-фокусу на базі референсу «РІАП», досягти позитивного операційного потоку в Рік 2 і паралельно розгорнути пілоти SAaaS (10–15% портфеля), використовуючи лізинг/партнерське фінансування.

Таблиця 4.13 – Використання коштів і дорожня карта масштабування (ілюстративно)

Стаття використання	Частка	Призначення	Цільовий результат/мільйони грн
Оборотний капітал/запаси	35%	Буфер HEPA/BIBO, рукави, сорбент, вентилятори	Скорочення термінів постачання; SLA складу
R&D / продукт	20%	Нові укриття, алгоритми керування за KPI, SAaaS	Зниження COGS; підвищення маржі сервісу
Продажі/маркетинг	20%	Пілоти, референс-візити, тендерна підтримка	10→35 ліній/рік; нові регіони
Сервіс/калібрування	15%	Інструменти, транспорт, навчання партнерів	«Он-тайм» IQ/OQ/PQ $\geq 95\%$; ARR retention $\geq 110\%$
Адміністративні/ІТ	10%	SCADA-хостинг, кібербезпека, юридичний комплаєнс	ESG/аудити; безпека даних

Джерело розроблено автором

Інвесторський пакет включає: (1) конвертований займ або частку капіталу з цільовим горизонтом 5–7 років; (2) права на пріоритет участі в раундах, (3) панель KPI з квартальною звітністю (встановлена база, ARR, валова маржа, «он-тайм» PQ, економія клієнтів, відгуки аудиторів), (4) ковенанти щодо буферного складу критичних компонентів і SLA з партнерами. Очікуваний фінансовий результат – позитивний вільний грошовий потік у Рік 2, EBITDA-маржа >20% у Рік 3, кумулятивний NPV портфеля проектів на горизонті 7 років – додатний при $r=12-15\%$. Потенційні виходи: стратегічний покупець (OEM фасувальних ліній/фільтраційна група), або інфраструктурний фонд, зацікавлений у SAaaS. Додану вартість створює «доказова база» з «РІАП»: це не слайди, а протоколи upstream/downstream, контрольні карти, енергетичні звіти та ТСО-калькулятори, що пришвидшують конверсію в тендерах і підтримують премію до ціни завдяки гарантіям KPI.

З позиції інвестора критично, аби бізнес тримався у «зеленому коридорі» ризиків: буферні запаси HEPA/BIBO і сорбентів на ≥ 2 місяці, друге джерело постачання на ключові вузли, стандартизовані навчальні траєкторії для партнерів-інсталяторів, регулярні оновлення «комплаєнс-пакета» під регуляторні зміни. Для замовника – важливо, що комерційні обіцянки підкріплені інженерними метриками, а для інвестора – що інженерні метрики конвертуються у передбачувані грошові потоки (ARR, витратники, розширення ліній). Саме тому інтегрована бізнес-модель «обладнання + сервіс + дані», спираючись на референс АТ «РІАП», має як практичну, так і інвестиційну привабливість: вирішує конкретний біль клієнта, масштабується стандартними блоками, продукує повторюваний дохід і демонструє чіткі шляхи деризикування – від буферних складів до KPI-контрактів і SAaaS [13].

Короткі висновки розділу 4.

Інноваційна ідея комерціалізації рішень базується на моделі «обладнання + сервіс + дані» з опцією Clean-Air-as-a-Service; цільові сегменти – агрохімічні підприємства й контрактні фасувальники в Україні та суміжних ринках. Аналіз ринку й конкурентів свідчить про нішу для інтегрованих платформ з гарантованими KPI, ВІВО-безпекою і прозорими ТСО; унікальна ціннісна пропозиція спирається на референс «РІАП» і підтверджені ефекти «до/після». Дорожня карта впровадження описує послідовність від аудиту до PQ-приймання й SLA-експлуатації, ресурсне забезпечення охоплює монтаж, сервіс, навчання персоналу та запас критичних витратників. Бізнес- і фінансова модель демонструють життєздатність (ARR від сервісу та витратників, окупність у цільовому коридорі, позитивний NPV у горизонті 5–7 років), а реєстр ризиків із заходами деризикування забезпечує керованість масштабування. У сукупності результати розділів 1–4 доводять, що запропонована техніко-економічна платформа здатна стабільно забезпечувати нормативно безпечні умови праці, знижувати екологічні впливи та формувати передбачувану економіку експлуатації для АТ «РІАП» і споріднених виробництв.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано прикладну науково-технічну задачу підвищення промислової та екологічної безпеки на ділянці фасування пестицидів АТ «Київський завод РІАП» шляхом проєктування і апробації інтегрованої системи локального перехоплення та пилогазоочистки з керуванням за гігієнічними показниками. Отримані результати підтверджують доцільність переходу від фрагментарних заходів (заміна окремих фільтрів, «нарощування» витяжки) до цілісної архітектури «джерело – перехоплення – каскадна очистка – моніторинг – експлуатаційна економіка», у якій керованою змінною стають не тільки витрати повітря, а й інтегральні індекси якості повітря робочої зони.

1. Показано, що основні ризики формуються на операціях засипання, дозування, укупорювання та наливу через одночасну наявність тонкодисперсного пилу і ЛОС. Первинний аудит виявив характерні «пікові» епізоди та нестабільність мінусового тиску, що унеможливило впевнене дотримання гігієнічних нормативів у робзоні без технологічного переосмислення системи.

2. Сформульовано та обґрунтовано вимоги до системи згідно з чинними нормами України й кращими практиками ЄС/ISO для повітря робочої зони, вибухозахисту, вентиляції та фільтрації. Критерії приймання переведено у вимірні KPI: $\Sigma(C_i/\Gamma DK_i)$ за зміну, перцентилі P95 для PM2.5/PM10 і ЛОС, частка часу зі стабільним мінусовим тиском, ефективності ступенів фільтрації (upstream/downstream) та відсутність витоків при ВІВО-замінах.

3. Розроблено програму досліджень та інструментальну базу: точки відбору в робчій зоні й каналах, методики для РМ/ЛОС/формальдегіду/NOx, схеми QA/QC та статистичної обробки (перцентильний аналіз, побудова індексу $\Sigma(C_i/\Gamma DK_i)$, контрольні карти ΔP). Це забезпечило відтворюваність вимірювань і коректне порівняння «до/після».

4. Запропоновано технологічну концепцію модернізації: герметизація вузлів і стандартні локальні укриття (kit-of-parts), розділення мережі на пилову й газову гілки з різними швидкісними режимами, трирівнева фільтрація «префільтр – рукавний – НЕРА (VIBO)» для пилової гілки та «префільтр туману – локальний НЕРА – сорбційний модуль (lead/lag)» для ЛОС, а також система моніторингу з контуром керування VFD за гігієнічними індикаторами.

5. Виконано розрахунки повітрообміну й аеродинамічних опорів, підібрано вентилятори, фільтроелементи, сорбенти та засоби інструментування. Сформовано принципові схеми ПГОС із вимірними ніпелями, контрольними перерізами та точками ΔP , що спростило пусконаладження й подальший аудит.

6. Пілотні випробування на ділянці «РІАП» підтвердили ефективність підходу: відсутність різких піків у робочій зоні під час критичних операцій, зниження інтегрального індексу $\Sigma(C_i/GDK_i)$ до цільових значень (типово в інтервалі $\approx 0,25-0,35$ у штатних режимах), наближення РМ після НЕРА до фонового рівня, утримання мінусового тиску в камерах у $\geq 95\%$ часу зміни. Upstream/downstream-вимірювання засвідчили належну сумарну ефективність каскаду; VIBO-процедури дозволили виключити гострі експозиції персоналу під час замін.

7. Вбудований моніторинг (РМ, ЛОС, ΔP , статичні тиски) разом зі SCADA/EMS та алгоритмами «керування за KPI» продемонстрували практичну керованість процесу: у разі наближення до порогів система автоматично підвищує частоту VFD, пропонує операторові перевірочні дії, блокує рециркуляцію (якщо наявна) та створює сервісні тікети. Це змінило характер експлуатації – з реактивної на превентивну.

8. Енергетичний ефект досягнуто завдяки керуванню за потребою (закони подібності для вентиляторів), розділенню гілок і правильному навантаженню фільтроелементів: знизились середні витрати енергії на одиницю продукту, стабілізувався профіль ΔP , збільшився ресурс НЕРА та сорбенту. У підсумку ТСО системи прогнозовано зменшився, а термін простої окупності

модернізації забезпечено в цільовому коридорі (до ≈ 3 років за базових тарифів і завантаження).

9. Сформовано пакет приймальних випробувань та експлуатаційних документів (IQ/OQ/PQ, протоколи up/down, HEPA-leak-test, «точка прориву» сорбенту, контрольні карти ΔP , СОП ВІВО), що підвищує довіру аудиторів і спрощує взаємодію з наглядовими органами та страховими компаніями.

Підсумок. Інтегрований підхід із джерелозорієнтованим перехопленням, розділеними пиловою та газовою гілками, каскадною фільтрацією «префільтр – HEPA – сорбент», ВІВО-процедурами та моніторингом з керуванням за гігієнічними КРІ довів здатність стабільно забезпечувати нормативно безпечні умови праці на ділянці фасування пестицидів, мінімізувати ризики гострих експозицій, зменшувати енерговитрати і робити експлуатаційну економіку передбачуваною. Рішення є технічно й економічно доцільним для масштабування на інші ділянки АТ «РІАП» і суміжні підприємства галузі.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Апробацію результатів магістерської дисертації здійснено у двох взаємодоповнюваних форматах – публічному (академічному) та виробничому. Публічна апробація передбачала представлення основних науково-технічних положень роботи на наукових заходах і в публікаціях, що дало можливість отримати фахові рецензії та зауваження, які враховано під час остаточного доопрацювання тексту дисертації. Виробнича апробація виконувалася на дільниці фасування АТ «Київський завод РІАП» шляхом дослідного впровадження елементів запропонованої системи локального перехоплення і пилогазоочистки з моніторингом за гігієнічними індикаторами, з оформленням відповідних актів випробувань і рекомендацій до промислового масштабування. За результатами апробації підтверджено практичну спроможність рішень і досягнення цільових показників за сукупністю КРІ (зниження $\Sigma(\text{Ci/ГДКi})$ у робочій зоні, стабілізація мінусового тиску, ефективності ступенів фільтрації, керованість енергоспоживання).

Публічна апробація включала доповіді на засіданнях профільної кафедри та науково-технічної ради факультету, де було схвалено тематику, структуру роботи, методики вимірювань і розрахункові підходи; відповідні витяги з протоколів додаються. Підготовлено та представлено наукові матеріали у відкритому доступі: тези доповіді на всеукраїнській (за участю міжнародних партнерів) науково-практичній конференції з проблем промислової екології та охорони праці; матеріали містять опис програмної схеми дослідження, вибраних методів інструментального контролю ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$, ЛОС, формальдегід, NO_x), статистичної обробки та первинні результати пілотних вимірювань. Підготовлено рукопис статті до фахового наукового журналу категорії «Б», спрямований на узагальнення результатів пілотних випробувань і економічної оцінки (TCO/PP/NPV) із порівнянням «до/після». У матеріалах статті наведено відтворювані схеми вимірювань, принципові схеми ПГОС, контрольні карти ΔP і перцентильний аналіз концентрацій, що уможливорює

незалежну перевірку висновків. Окремо підготовлено стислий англomовний executive summary для подальшої подачі на галузевий семінар із промислової вентиляції та фільтрації.

Виробнича апробація виконувалася на базі АТ «РІАП» у рамках дослідного ретрофіту окремих вузлів лінії фасування (дозування, укупорювання, налив). Складено та погоджено з підприємством програму пусконаладжувальних робіт і випробувань, проведено серії інструментальних вимірювань у форматі upstream/downstream на ступенях фільтрації та в робочій зоні, здійснено приймально-здавальні випробування елементів системи (локальні укриття, рукавний фільтр, HEPA-модулі з ВІВО, сорбційний блок, контур керування VFD). За результатами оформлено «Акт приймально-здавальних випробувань дослідної ділянки» з додатками у вигляді таблиць контрольних показників, протоколів калібрування датчиків, графіків трендів ЛОС/РМ і контрольних карт ДР. Виробничо-технічною радою підприємства розглянуто «Техніко-економічне обґрунтування ретрофіту ПГОС фасувальної ділянки», рішенням ради рекомендовано впровадження в промислову експлуатацію в два етапи (пілот – масштабування) з подальшим моніторингом КРІ за затвердженою матрицею «процес – метрика – гейт». Окремим документом оформлено «Рекомендації щодо експлуатації та технічного обслуговування» (SOP: ВІВО-заміни, leak-test HEPA, контроль «точки прориву» сорбенту, періодичність перевірок швидкостей захоплення та статичних тисків у камерах).

З метою правової охорони технічних рішень підготовлено матеріали для подання раціоналізаторської пропозиції на підприємстві щодо використання розділених пилової/газової гілок із каскадною фільтрацією та інтегрованим моніторингом; оформлено комплект креслень і пояснювальну записку. У межах патентно-аналітичної частини роботи уточнено ознаки новизни, сформовано попередні формули, проведено пошук аналогів і прототипів у базах Espacenet та WIPO; за підсумком підготовлено драфт заявки на деклараційний патент України на корисну модель (робоча назва – «Система локального перехоплення

і каскадної пилогазоочистки фасувальних ліній із керуванням за гігієнічними індикаторами»). Фінальне подання заявки погоджується із підприємством з урахуванням режиму конфіденційності.

До підтверджувального пакета, що додається до дисертації, входять: витяги з протоколів засідання кафедри та науково-технічної ради факультету про схвалення результатів; копія тез доповіді на конференції (PDF із вихідними даними видання); копія рукопису або приймального листа до наукового журналу; акт приймально-здавальних випробувань дослідної ділянки АТ «РІАП» із додатками протоколів вимірювань та фотоматеріалами; лист-підтвердження підприємства про прийняття до впровадження; примірник внутрішньої СОП з обслуговування фільтраційних модулів і процедур ВІВО; довідка про подання раціоналізаторської пропозиції або заяви на корисну модель; лист відділу охорони праці/екології про позитивні результати пілотної експлуатації за КРІ. Усі документи мають нумерацію, дату та підписи відповідальних осіб; електронні копії у форматі PDF подано у складі додатків до дисертації.

Таким чином, апробація підтвердила наукову новизну і практичну придатність запропонованих рішень: вони витримали фахове обговорення на академічних майданчиках, продемонстрували вимірний гігієнічний та енергоекономічний ефект у виробничих умовах і отримали підтримку підприємства для поетапного масштабування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. «Основи вентиляції житлових та промислових об'єктів»: навч. посібник / Харківський політехнічний інститут. – Харків, 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://web.kpi.kharkov.ua/teplo/wp-content/uploads/sites/62/2024/08/32Osnovi-ventilyatsiyi-_23.pdf (дата звернення: 24.10.2025).
2. AAF Flanders. Testing HEPA Filters: Guidelines for the Factory and Field. – 2018. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://aafeurope.com/fileadmin/user_upload/Blogs/Downloads/20190311_Guidelines_for_testing_hepa_filters.pdf (23.10.2025).
3. Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC). Review of international standards describing air cleaner performance (ISO 10121 / ASHRAE 145.x). – 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.aivc.org/sites/default/files/122_1.pdf (23.10.2025).
4. ASHRAE 145.2. Laboratory test method for measuring the performance of in-duct sorptive media gas-phase air-cleaning devices: tech. brief. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bryair.com/wp-content/uploads/2025/06/AMJ12NL18Aug.pdf> (23.10.2025).
5. British Occupational Hygiene Society (BOHS). Testing Compliance with OELs for Airborne Substances. – 2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bohs.org/app/uploads/2022/11/Testing-Compliance-with-OELs-for-Airborne-Substances-2022.pdf> (23.10.2025).
6. Camfil. Understanding your HEPA filter. – 2023. – 28 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.camfil.com/-/media/files/qbank/documents/___web/nofolder/understanding-your-hepa-filter-booklet-eng-finish-\(1\).pdf](https://www.camfil.com/-/media/files/qbank/documents/___web/nofolder/understanding-your-hepa-filter-booklet-eng-finish-(1).pdf) (23.10.2025).
7. Directive 2010/75/EU on Industrial Emissions (IED): Директива Європейського Парламенту та Ради від 24.11.2010. – [Електронний ресурс]. –

Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A02010L0075-20110106> (23.10.2025).

8. EN 1822-1:2019. High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA). Part 1: Classification, performance testing and marking. – Brussels: CEN, 2019. – [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/63578/3716a7e1fb9447d7871937965cebdeb0/SI-ST-EN-1822-1-2019.pdf> (23.10.2025). Альтернативне джерело: <https://www.airum.com/frontend/immagini/files/EN%201822-1.PDF>

9. EN 689:2018 + AC:2019. Workplace exposure — Measurement of exposure by inhalation to chemical agents — Strategy for testing compliance with OELVs. – Brussels: CEN, 2019. – [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/67662/4d4222e120a441f685a6707986fa849e/SI-ST-EN-689-2018-AC-2019.pdf> (23.10.2025).

10. EN ISO 29463 (series overview). – 2019. – [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intertekinform.com/preview/449902611580.pdf> (23.10.2025).

11. EPA / OSHA / NIOSH. Formaldehyde methods: OSHA T-1007; ARB MLD022; NIOSH compendium. – [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/osha-1007.pdf>; <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-01/mld022.pdf>; <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/2018.pdf> (23.10.2025).

12. Industrial Emissions Directive — consolidated explanation (Energy Community). – 2017. – [Электронный ресурс]. – Режим доступу: https://www.energy-community.org/dam/jcr%3A32f06165-f591-442f-9a38-4f4a5e975136/Directive_2010_75_ENV.pdf (23.10.2025).

13. ISO 16200-2:2000. Workplace air quality — VOCs by solvent desorption / GC — Part 2: Diffusive sampling method. – [Электронный ресурс]. – Режим доступу: https://webstore.ansi.org/preview-pages/ISO/preview_ISO%2B16200-2-2000.pdf (23.10.2025).

14. ISO 16200-2:2000. Workplace air quality — Sampling and analysis of volatile organic compounds by solvent desorption / gas chromatography. Part 2. — Geneva: ISO, 2000. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/30188/85dd7d1b8b084a9fb0f750f7823c52ac/ISO-16200-2-2000.pdf> (23.10.2025).

15. ISO 29463-1:2011 / 2017. High-efficiency filters and filter media for removing particles in air. Part 1: Classification, performance testing and marking. — Geneva: ISO. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ftncore.com/wp-content/uploads/2021/11/ISO-29463-1-2017.pdf> (23.10.2025).

АЛЪТ.: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/51835/f045c586a66b4583a2741546bf2cef53/ISO-29463-1-2011.pdf>

16. Passive Samplers for Investigations of Air Quality (Engineering Issue Paper). — 2015. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.siremlab.com/wp-content/uploads/2021/02/Engineering-Issue-Paper-2015-Passive-Samplers-for-Investigations-of-Air-Quality.pdf> (23.10.2025).

17. Regulation (EC) No 1272/2008 (CLP): Регламент (ЄС) № 1272/2008 від 16.12.2008 про класифікацію, маркування та пакування речовин і сумішей. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://poisons.ie/wp-content/uploads/2021/09/Regulation-EU-1272_2008-1.pdf (23.10.2025).

18. Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH): Регламент (ЄС) № 1907/2006 від 18.12.2006. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:136:0003:0280:en:PDF> (23.10.2025).

19. US EPA. Compendium Method TO-11A. Determination of Formaldehyde in Ambient Air Using Adsorbent Cartridge Followed by HPLC. — 1999 (оновл.). — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/to-11ar.pdf> (23.10.2025).

20. US EPA. Method 325A. Volatile Organic Compounds Using Passive Sampling at the Facility Perimeter. — 2017. — [Електронний ресурс]. — Режим

доступу: https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-08/documents/method_325a.pdf (23.10.2025).

21. US EPA. Method 7E. Determination of Nitrogen Oxides Emissions from Stationary Sources (Instrumental Analyzer Procedure). – 2020. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/method_7e_2.pdf (23.10.2025).

22. World Health Organization (WHO). WHO Global Air Quality Guidelines – full version. – 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ghd.pku.edu.cn/docs/2021-09/2f00edbd847d4b3183f17393e43afa86.pdf> (23.10.2025).

23. World Health Organization (WHO). WHO Global Air Quality Guidelines: PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂, CO — Executive summary. – Geneva, 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://archiv.szu.cz/uploads/documents/chzp/ovzdusi/who_guidelines/WHO_guidelines_ambient_air_2021_summary_aj.pdf (23.10.2025).

24. World Health Organization (WHO). WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. – Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2010. – 454 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/260127/9789289002134-eng.pdf> (23.10.2025).

25. Боженко М. Ф., Яременко Є. Г. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря: навч. посібник. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2019. – 264 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/53455317-4a55-485c-8d61-15c9903e4ce7/content> (24.10.2025).

26. Боженко М. Ф., Яременко Є. Г. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря: навч. посібник. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2019. – 380 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/53455317-4a55-485c-8d61-15c9903e4ce7/content> (24.10.2025).

27. ВЕНТС. Вентиляція: теоретичні основи і приклади розрахунків (галузевий довідник). – Київ, 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vents.ua/upload/0161277001640699140.pdf> (24.10.2025).
28. Вітяганець В. С. Контроль стану повітряного середовища виробничих приміщень: навч. посібник. – Кременчук: КрНУ, 2015. – 140 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/185575336.pdf> (24.10.2025).
29. Вінницький національний технічний університет (ВНТУ). Оцінка і оздоровлення повітря робочої зони та теплотахист: навчально-методичні матеріали. – Вінниця, 2019. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2014/11/...> (24.10.2025).
30. Волошин М. Д. Пневмотранспортні системи: конспект лекцій. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. – 154 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dstu.dp.ua/Portal/Data/5/7/5-7-kl18.pdf> (24.10.2025).
31. Гічов Ю. О. Очищення газів. Частина I: навч. посібник. – Дніпро: НМетАУ, б.р. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nmetau.edu.ua/file/21._gichov_yu.o._ochischennya_gaziv._chastina_i.pdf (24.10.2025).
32. Гічов Ю. О. Очищення газів. Частина II: навч. посібник. – Дніпро: НМетАУ, б.р. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nmetau.edu.ua/file/22._gichov_yu.o._ochischennya_gaziv._chastina_ii.pdf (24.10.2025).
33. Глущенко О. Л. Очищення газів: конспект лекцій. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. – 132 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-z_kl30.pdf (24.10.2025).
34. Гранкіна В. В. Вентиляція: навч. посібник. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2010. – 122 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://eprints.kname.edu.ua/21292/1/2010_поз.207Лпеч.вар._посл.pdf (24.10.2025).

35. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря. – Київ: Мінрегіон України, 2013. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ensy.com.ua/documents/dbn/dbn-b.2.5-67-2013.pdf> (24.10.2025).
36. Проєкт ДБН В.2.5-67:20XX (редакція 2025). Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря. – Київ, 2025. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2025/07/dbn-v25-67-20xx-opalennia-ventiliaciia-ta-kondicionuvannia-povitria-persa-redakciia.pdf> (24.10.2025).
37. Джеджула В. В. Вентиляція та кондиціювання громадських об'єктів: навч. посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 71 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Dzhedzhula_2021_71.pdf (24.10.2025).
38. Джеджула В. В. Серeda Д. С., Боженко М. Ф. — «Високоєфективні системи вентиляції і кондиціювання повітря громадських та промислових будівель» // Енергетика: економіка, технології, екологія, 2014, № 4(38), с. 66–71.
39. Довідкова пам'ятка щодо безпечного використання пестицидів (узагальнення вимог ДСП 8.8.1.2.001-98). – Чернівецька обл. Держпродспоживслужба, 2019. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.consumer-cv.gov.ua/doc/ses/attention_pesticides/4.pdf (24.10.2025).
40. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». – Київ: МОЗ України, 1999. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99> (24.10.2025).
41. ДСНС України. Методичні рекомендації щодо процедур відбору проб під час НС. – Київ, 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zk.dsns.gov.ua/upload/1/6/1/8/4/2021-9-8-metodicni-rekomendaciyi.pdf> (24.10.2025).
42. ДСП 8.8.1.2.001-98 «Транспортування, зберігання та застосування пестицидів у народному господарстві». – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0001282-98> (24.10.2025).
43. ДСТУ ISO 14644-1:2009 «Чисті приміщення та пов'язані з ними контрольовані середовища. Частина 1. Класифікація чистоти повітря». – Київ,

2009. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/chisti_primischennya_ta_povyazan-3-465688.pdf (24.10.2025).

44. ДСТУ ISO 14644-4:2012 «Чисті приміщення... Частина 4. Проектування, будівництво та введення в експлуатацію». – Київ, 2012. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/chisti_pr._proektuvannya_budivni-3-465707.pdf (24.10.2025).

45. Журнал «Екологічна безпека та природокористування» (ІТГІП НАНУ). Збірники № 18 (2017) та № 26 (2018): статті з екологічної безпеки повітря, теплотехнічних процесів і забруднень. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://itgip.org/wp-content/uploads/2016/11/ekol-zb-18.pdf>; <https://itgip.org/wp-content/uploads/2018/08/ekol-zb-26.pdf> (24.10.2025).

46. Журнал «Довкілля та здоров'я». Вплив летких органічних сполук у повітрі приміщень на здоров'я населення: оглядова стаття. – Київ, 2011. – 10 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dovkil-zdorov.kiev.ua/env/59-0031.pdf> (24.10.2025).

47. Журнал «Технічні науки та технології» (Університет ім. В. І. Вернадського). Система вентиляції і кондиціювання повітря в освітніх установах: стаття. – 2023. – 7 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/3_2023/part_1/13.pdf (24.10.2025).

48. Закон України «Про відходи» від 05.03.1998 № 187/98-ВР (витяг; інформаційний PDF). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ukr50164.pdf> (23.10.2025).

49. Закон України «Про пестициди і агрохімікати». – Відомості ВРУ, 1995, № 14, ст. 91 (з наступними змінами). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ukr61496.pdf> (24.10.2025).

50. ВЕНТС. Вентиляція: теорія і приклади розрахунків — довідник-брошура. – Київ, 2021. – 120 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vents.ua/upload/0161277001640699140.pdf> (24.10.2025).

51. Кафедра ЕКО-паперу КПП. Методичні вказівки до курсового проєкту з тематики газоочистки (розділи з пиловловлювання, розрахунки). – Київ, 2013. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eco-paper.kpi.ua/images/documents/metodichki/eco/2k/TOZA_KP.pdf (24.10.2025).

52. Координатор проєктів ОБСЄ в Україні. Методичні рекомендації щодо процедур відбору проб (довкілля, зокрема повітря). – Київ, 2020. – 160 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.osce.org/files/f/documents/d/8/473949.pdf> (24.10.2025).

53. Корнієнко Г. М. (уклад.). Процеси та апарати галузі. Гідромеханічні та механічні процеси: робочий зошит. – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 124 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ci.kpi.ua/METODA/WorkBook_Kornienko_РАНТ.pdf (24.10.2025).

54. Крусір Г. В., Мадані М. М., Гаркович О. Л. Техніка та технології очищення газових викидів: навч. посібник. – Одеса: ОНАХТ, 2017. – 207 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/c25eec0b-557e-4966-8714-b3eeda960062/download> (24.10.2025).

55. Міністерство охорони здоров'я України. Методичні рекомендації з оцінки ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами. – Київ, 2024. – 64 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (посилання на PDF, дата звернення: 24.10.2025).

56. Міністерство охорони здоров'я України. Наказ № 1257 від 13.10.2017 «Про затвердження гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони». – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1353-17> (24.10.2025).

57. Міністерство охорони здоров'я України. Наказ № 1596 від 14.07.2020 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони». – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0741-20> (24.10.2025).

58. НМУ, кафедра гігієни. Гігієна та основи екології: метод. вказівки (розд. «Повітря робочої зони»). – Запоріжжя, 2020. – 48 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.zsmu.edu.ua/bitstream/123456789/12674/1/...> (24.10.2025).

59. Організація з безпеки і співробітництва в Європі (ОБСЄ) в Україні. Методичні рекомендації з відбору проб (повітря, вода, ґрунт): посібник. – Київ, 2020. – 160 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://osce.org/files/f/documents/d/8/473949.pdf> (24.10.2025).

60. Основи біобезпеки: навч. посібник. – Львів: Інститут екології Карпат НАНУ, 2019. – 160 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://inenbiol.com/images/stories/Rozrobky/Books/full/osnovy_biobezpeky.pdf (24.10.2025).

61. Офіційні документи. Екологічні норми – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecologiya.com.ua/norm/26433/printable/pdf> (23.10.2025).

62. Петренко В. І. та ін. Інфекційний контроль та профілактика туберкульозу: навч. посібник. – Київ: НМУ ім. О. О. Богомольця, 2023. – 208 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ir.librarynmu.com/bitstream/123456789/11075/1/Інфекційний_контроль_та_профілактика_туберкульозу.pdf (24.10.2025).

63. Посібник з відбору та аналізу повітря (КПІ / ПДМУ): методичні матеріали для санітарно-гігієнічних вимірювань. – Полтава: ПДМУ, 2020. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecology.pdmu.edu.ua/storage/common/docs/82l2AGttCmToB7vZqjoZg5qttqQHh1HxXfrWck5s.pdf> (24.10.2025).

64. Постанова Кабінету Міністрів України від 23.07.2024 № 847 «Технічний регламент щодо безпечності хімічної продукції». – Київ, 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/07/Tehnichnyj-reglament-shhodo-bezpechnosti-himichnoyi-produktsiyi.pdf> (24.10.2025).

65. Ратушняк Г. С. Теоретичні основи технології очищення газових викидів: навч. посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 96 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Ratushnjak_2002_96.pdf (24.10.2025).

66. Рибалова О. В., Цимбал С. В. Процеси та апарати пилогазоочищення: практикум. – Харків: НУЦЗУ, 2023. – 116 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17685/1/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D0%B8%20%D1%82%D0%B0%20%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B8%20%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%20%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D1%83%D0%BC%20%28%D0%A0%D0%B8%D0%B1%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%A6%D0%B8%D0%BC%D0%B1%D0%B0%D0%BB%29%20%D0%B8%D1%81%D0%BF%D1%80.pdf (24.10.2025).

67. Рибалова О. В., Цимбал С. В. Космічні технології. – Харків: НУЦЗУ, 2024. – 120 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://space-scitechjournal.org.ua/uk/search?f\[author\]=1155](http://space-scitechjournal.org.ua/uk/search?f[author]=1155) (24.10.2025).

68. Садова М. М. Активоване вугілля і цеоліти як сорбенти: дис. ... канд. хім. наук. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2018. – 190 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1631/sadovadysertaciya.pdf> (24.10.2025).

69. Северин Л. І., Петрук В. Г., Безвозюк І. І., Васильківський І. В. Природоохоронні технології. Частина перша: Захист атмосфери: навч. посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 388 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/LAN/Severin_2012_388.pdf (24.10.2025).

70. Семенюк М. В. Підвищення ефективності сухого видалення пилу відцентровими фільтрами: дис. ... канд. техн. наук. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2018. – 150 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1518/dissemeniuk.pdf>
(24.10.2025).

71. Східно-український національний університет ім. В. Даля. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища: підручник. – Сєверодонецьк, 2018. – 360 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://deps.snu.edu.ua/media/filer_public/f9/3e/f93e762d-4e8d-4334-8d0b-282c89e239a3/metodi_vimiriuvannia_par_ns_8_04_pidruchnik_.pdf (24.10.2025).

72. Стандарт організації України СОУ 19-ЛКМ «Обмеження вмісту ЛОС у лакофарбових матеріалах»: норма та методи контролю. – Київ: GreenMind, 2021. – 32 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://greenmind.com.ua/images/2021/sou-019-lkm.pdf> (24.10.2025).

73. Сумський національний аграрний університет. Машини та апарати для очищення газів: навч. посібник. – Суми: СНАУ, 2018. – 212 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/5289/1/Мон.pdf> (24.10.2025).

74. Фармацевтичний факультет УДХТУ. Спеціальне обладнання та проектування хіміко-фармацевтичних виробництв: методичні вказівки (розділи про НЕРА/ULPA). – Дніпро: УДХТУ, 2024. – 168 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/11/metodychni-vkazivky-speczobladnannya-sam-rob.pdf> (24.10.2025).

75. Янушевська О. І. Екологічна безпека технологічних процесів в аспекті знешкодження оксидів нітрогену: електронне навчальне видання. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 73 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/4463ab74-e83c-4ed3-b888-1edbab8d7f41/download> (24.10.2025).