



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет гірничо-металургійний  
Кафедра безпеки праці та охорони довкілля

**Кваліфікаційна робота  
допущена до захисту**

Гарант ОПП «Інноваційні технології та  
системи захисту навколишнього  
середовища»

ПІКАРЕНЯ Д.С. \_\_\_\_\_

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Інноваційні технології та системи захисту навколишнього  
середовища»

за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища

на тему «Розробка заходів підвищення ефективності пилогазоочиски у  
метизному виробництві»

Керівник

Богомаз О.П.

(Прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант від  
бази практики

Патенко Р.В.

(Прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Здобувач

Ченський Д.А.

(Прізвище та ініціали)

(підпис)

Кам'янське 2025

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить 112 сторінок, 2 ілюстрації, 22 таблиці, 0 додатків, 89 джерел згідно з переліком посилань.

Об'єктом дослідження є процес викидів пилу в атмосферне повітря.

Мета роботи – розробка заходів для підвищення ефективності пилогазоочистки на ТОВАРИСТВО З ДОДАТКОВОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ЗАВОД МЕТИЗ", що дозволяє знизити обсяги викидів шкідливих речовин та покращити умови праці.

В першому розділі проведено аналіз сучасних технологій пилогазоочистки, визначено їх переваги та недоліки.

В другому розділі вивчено технічний стан циклону ЦН-11-630-1У, який використовується на підприємстві, та його експлуатаційні характеристики. Виконано моделювання ефективності очищення та аналіз структури викидів.

В третьому розділі запропоновано комплекс заходів для модернізації системи пилогазоочистки, зокрема вдосконалення конструкції циклону та інтеграція комбінованих методів очищення.

В четвертому розділі оцінено екологічні наслідки впровадження запропонованих рішень та їхню відповідність нормативним вимогам.

В п'ятому розділі виконано економічний аналіз ефективності запропонованих заходів, що дозволяє скоротити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність виробництва.

Ключові слова: пилогазоочистка, циклон, металургійне виробництво, модернізація, екологічна безпека.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПИЛОГАЗООЧИСТКИ.....	7
1.1. Сучасний стан технологій пилогазоочистки.....	7
1.2. Основні джерела пилогазових викидів та їхній вплив на довкілля.....	20
1.3. Огляд існуючих методів очищення.....	27
1.4 Висновки до Розділу 1.....	32
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПИЛОГАЗООЧИСТКИ НА МЕТИЗНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ.....	34
2.1 Небезпечні та шкідливі фактори в виробничих умовах метизного підприємства .....	34
2.2 Технічний стан циклону ЦН-11-630-1У та його експлуатаційні характеристики на метизному підприємстві.....	38
2.3 Аналіз структури викидів та моделювання ефективності очищення.....	43
2.4 Оцінка екологічних наслідків та відповідність сучасним стандартам.....	52
2.5 Висновки до розділу 2.....	54
3 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПИЛОГАЗООЧИСТКИ.....	57
3.1. Технологічні рішення для модернізації циклону ЦН-11-630-1У.....	57
3.2. Інтеграція комбінованих систем очищення.....	65
3.3. Модернізація пилогазоочищувального обладнання для зниження енергоспоживання.....	70
3.4 Висновки до розділу 3.....	75

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	78
5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ПИЛОГАЗООЧИСТКИ.....	90
ВИСНОВКИ.....	99
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	102

## ВСТУП

Сучасний стан екологічних проблем обумовлений інтенсивною діяльністю промислових підприємств, серед яких металургійна промисловість займає ключове місце. Одним із важливих завдань є зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище, зокрема шляхом вдосконалення систем пилогазоочистки, що забезпечують мінімізацію викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Актуальність теми полягає в необхідності підвищення ефективності пилогазоочистки, яка дозволяє не лише знизити екологічне навантаження, але й забезпечити відповідність сучасним нормативним вимогам та підвищити економічну рентабельність виробництва.

Об'єктом дослідження є процес викидів пилу в атмосферне повітря.

Предмет дослідження - заходи зменшення викидів пилу на метизному підприємстві.

Мета роботи – розробка заходів для підвищення ефективності пилогазоочистки на підприємствах, що дозволяє знизити обсяги викидів шкідливих речовин та покращити умови праці.

Методи дослідження: аналіз технічної документації, математичне моделювання, розрахункові методики оцінки екологічної та економічної ефективності, експериментальні дослідження.

Задачі дослідження:

1. Виконати аналіз сучасного стану систем пилогазоочистки та визначити основні недоліки.
2. Провести оцінку технічного стану циклону ЦН-11 та структури викидів на метизному підприємстві.

3. Розробити технічні заходи для модернізації системи пилогазоочистки.
4. Оцінити економічну ефективність запропонованих заходів.
5. Визначити екологічний вплив модернізації системи пилогазоочистки.
6. Розробити рекомендації щодо впровадження модернізаційних заходів у систему пилогазоочистки метизного підприємства.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для зниження викидів шкідливих речовин, оптимізації роботи пилогазоочисного обладнання та зменшення екологічних ризиків.

Особистий внесок здобувача включає виконання аналізу, розробку та моделювання запропонованих технічних рішень, проведення розрахунків економічної та екологічної ефективності.

Апробація результатів здійснювалась шляхом публікації, за тематикою роботи, тези доповіді на II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Комплексне використання ресурсів довкілля».

# 1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПИЛОГАЗООЧИСТКИ

## 1.1. Сучасний стан технологій пилогазоочистки

Забруднення атмосферного повітря промисловими викидами є однією з найважливіших екологічних проблем сучасного виробництва. Значна частина шкідливих речовин у складі промислових газів представлена твердими частинками пилу та газовими домішками, що можуть містити токсичні сполуки. Для мінімізації їхнього впливу на довкілля використовуються різні методи пилогазоочистки, які забезпечують зменшення концентрації забруднень у газовому потоці перед його викидом в атмосферу.

Сучасні системи пилогазоочистки поділяються на сухі, мокрі, комбіновані та інноваційні методи. Кожна з цих технологій має свої особливості, що визначають їхню ефективність, енергоспоживання, можливість інтеграції у виробничі процеси та відповідність екологічним стандартам.

Сухі методи очищення передбачають використання обладнання, що працює без застосування рідин. Одним із найбільш поширених варіантів є циклонні установки, які ефективно видаляють крупнодисперсний пил завдяки відцентровому розділенню частинок. Вони відзначаються низькими експлуатаційними витратами, але їх ефективність щодо дрібнодисперсного пилу залишається обмеженою. Альтернативою є рукавні фільтри, що використовують тканинні мембрани для утримання частинок пилу розміром до 2 мкм. [1] Ці фільтри забезпечують ефективність очищення понад 99% і широко застосовуються у хімічній, фармацевтичній та цементній промисловості. Також у цій категорії знаходяться електрофільтри, які затримують частинки пилу в електростатичному полі. Вони ефективні

для видалення дрібнодисперсного пилу та газових забруднювачів, що містяться у високотемпературних технологічних газах.

Мокрі методи очищення використовують контакт газового потоку з рідиною, що дозволяє одночасно видаляти тверді та газові забруднення. Найбільш поширеними є скрубери, у яких газ проходить через краплі рідини або пористі насадки, що ефективно зв'язують шкідливі частинки. У промисловості також використовуються Вентурі-скрубери, що створюють турбулентний потік, який покращує контакт пилу з рідиною. [2] Такі методи найчастіше застосовуються в енергетиці та хімічному виробництві, де необхідна висока ефективність уловлювання частинок менше 2 мкм.

Комбіновані методи поєднують кілька технологій для підвищення ефективності очищення. Наприклад, комбінація циклону з рукавними фільтрами дозволяє попередньо видалити великі частинки пилу, зменшуючи навантаження на фільтри та продовжуючи їх термін служби. Також застосовується поєднання електрофільтрів зі скруберами, що дає змогу не лише очищати гази від пилу, а й зменшувати концентрацію газових домішок.

До інноваційних технологій відносяться плазмокаталітичні установки та регенеративне термічне окислення, що забезпечують високу ефективність очищення, особливо при роботі з токсичними газами та дрібнодисперсним пилом. Вони використовують передові фізико-хімічні процеси, що дозволяють не лише фільтрувати гази, а й розкладати небезпечні речовини до безпечних компонентів. [3] Проте висока вартість обладнання та енерговитрати обмежують їх широке застосування.

Залежно від галузі промисловості вибір системи пилогазоочистки визначається не лише ефективністю, а й економічною доцільністю. Для металургії та цементної промисловості характерні комбіновані системи, що дозволяють працювати з великими обсягами газів. У хімічному

виробництві частіше застосовуються мокрі методи, що дають змогу одночасно очищати гази від пилу та хімічних сполук.

Розвиток технологій пилогазоочистки спрямований на підвищення ефективності фільтрації, зменшення витрат на експлуатацію та впровадження цифрових систем контролю викидів. Нові матеріали для фільтраційних елементів, автоматизовані системи регулювання та відновлення ресурсів дають змогу не лише відповідати чинним екологічним стандартам, а й знижувати виробничі витрати.

У таблиці 1.1 наведено основні характеристики сучасних методів пилогазоочистки.

Таблиця 1.1 – Методи пилогазоочистки

Метод	Що відноситься	Де використовується	Ефективність	Переваги	Недоліки
Циклони та їх модифікації	Сухий метод	Металургія, цементна промисловість	Середня (до 85%)	Простота, низька вартість	Низька ефективність для дрібного пилу
Рукавні фільтри	Сухий метод	Хімічна промисловість, виробництво добрив	Висока (до 99,9%)	Висока ефективність, відповідність стандартам	Високі експлуатаційні витрати
Електрофільтри	Сухий метод	ТЕС, металургійні заводи	Висока (до 99%)	Ефективність для високотемпературних потоків	Висока вартість обладнання
Скрубери	Мокрий метод	Хімічна, фармацевтична промисловість	Висока для пилу та газових забруднень	Можливість одночасного видалення пилу та газів	Високі витрати води, утилізація відходів

Прооуження таблиці 1.1

Вентури-системи	Мокрий метод	Енергетика, хімічна промисловість	Висока для дрібнодисперсного пилу	Ефективність у видаленні дрібного пилу	Складність конструкції, енерговитрати
Комбіновані системи	Комбінований метод	Складні газові потоки, високі вимоги до очищення	Дуже висока (понад 99%)	Гнучкість і можливість адаптації	Складність обслуговування, висока вартість
Плазмокаталітичні установки	Інноваційний метод	Енергетика, високотехнологічні підприємства	Висока, залежить від специфіки	Енергоефективність, сучасні стандарти	Дороге обладнання, потреба в спеціалістах

Джерело: розроблено автором на основі [1, 4, 5].

Вибір технології пилогазоочистки залежить від дисперсності частинок, оскільки різні методи мають різну ефективність для очищення газових потоків. Дрібнодисперсний пил (менше 2,5 мкм) значно складніше затримати механічними методами, тоді як для крупних частинок (>10 мкм) можна застосовувати більш прості системи.

Для грубодисперсного пилу (понад 10 мкм) ефективними є механічні методи очищення, які використовують гравітаційні сили або відцентрові потоки для осадження частинок. До таких методів належать гравітаційні камери та циклонні установки, які забезпечують ефективність уловлення від 75% до 95%. Вони широко застосовуються в металургії, цементній промисловості та гірничодобувній галузі.

Для середньодисперсного пилу (2,5–10 мкм) застосовуються фільтраційні та мокрі методи, які здатні затримувати дрібніші частинки. Рукавні фільтри мають ефективність понад 95% і використовуються в хімічній та фармацевтичній промисловості. Скрубери, які працюють за

принципом контакту газів із рідиною, видаляють частинки 5–20 мкм із ефективністю 85–98%. [6]

Для дрібнодисперсного пилу (<2,5 мкм) необхідні високотехнологічні методи, що працюють за електростатичним або хімічним принципом. Електрофільтри здатні ефективно затримувати частинки менше 0,1 мкм, забезпечуючи ступінь очищення понад 99%. Вентурі-скрубери використовують високошвидкісний потік для видалення частинок до 2 мкм, а плазмокаталітичні установки та інші інноваційні методи дозволяють не лише очищати газу, а й розкласти токсичні домішки [2].

Циклонні установки використовують принцип інерційного осадження частинок пилу за рахунок відцентрової сили. Забруднене повітря надходить у корпус циклону тангенціально, створюючи обертовий потік. У процесі руху газу пилові частинки, які мають більшу масу, ніж газова фаза, виштовхуються до стінок апарату під дією відцентрової сили та опускаються у бункер для збору пилу. Водночас очищене повітря виходить через верхній патрубок. Циклони мають коефіцієнт ефективності 75-95% для частинок пилу розміром понад 10 мкм. Для підвищення ефективності можуть використовуватися батарейні циклони, які забезпечують багатоступеневе очищення та дозволяють утримувати дрібнодисперсний пил [7].

Електрофільтри працюють за принципом електростатичного осадження частинок. У цих установках газовий потік проходить між зарядженими електродами, де на тверді частинки впливає електричне поле. Під дією сили Кулона частинки осідають на пластинах електрофільтра, після чого вони видаляються механічним струшуванням або продуванням. Ця технологія є особливо ефективною для очищення газів від частинок розміром до 0,1 мкм, забезпечуючи ступінь очищення понад 99% [11]. Електрофільтри широко застосовуються у металургії, енергетиці та цементній промисловості

завдяки їх високій ефективності та можливості роботи з великими обсягами газу.

## 1.2 Порівняльна таблиця ефективності методів залежно від розміру частинок пилу

Метод	Розмір частинок пилу (мкм)	Ефективність (%)	Галузі застосування
Гравітаційні камери	>50	40–60	Попередня очистка в металургії, цементній промисловості
Циклони	10–100	75–95	Металургія, гірнична промисловість, цементне виробництво
Рукавні фільтри	2–10	95–99	Хімічна, фармацевтична промисловість, металургія
Скрубери	5–20	85–98	Хімічна, фармацевтична промисловість
Електрофільтри	<0,1	99+	ТЕС, металургія, цементна промисловість
Вентурі-скрубери	<2	95–99	Енергетика, хімічна промисловість
Плазмокаталітичні установки	<0,1	99+	Високотехнологічні підприємства

Джерело: розроблено автором на основі [2, 8-10].

Фільтраційні системи, зокрема рукавні фільтри, здійснюють механічне затримання частинок пилу на поверхні пористої мембрани. Газовий потік проходить через спеціальні рукави, виготовлені з полімерних або тканинних матеріалів, на яких осідає пил. Для забезпечення постійної роботи такі фільтри оснащуються системами регенерації, що дозволяють періодично видаляти накопичений пил шляхом струшування або імпульсного продування. Рукавні фільтри демонструють ефективність очищення на рівні 95–99% для частинок

розміром 2–10 мкм, що робить їх оптимальними для використання у хімічній, фармацевтичній та харчовій промисловості [12].

Мокрі методи очищення, зокрема скрубери, базуються на контакті газового потоку з рідиною, що дозволяє не тільки затримувати тверді частинки, але й одночасно поглинати газові забруднювачі. У таких установках пилові частинки та аерозолі змочуються краплями рідини, що призводить до їх агломерації та осадження у спеціальних відстійниках. Найбільш ефективними є Вентурі-скрубери, які використовують високу швидкість газового потоку для створення інтенсивного контакту між газом і рідиною. Вони забезпечують ефективність очищення понад 98% для частинок розміром до 2 мкм [13].

Інноваційні методи очищення, такі як плазмокаталітичні установки, поєднують фізичні та хімічні принципи нейтралізації шкідливих домішок у промислових газах. В основі роботи таких систем лежить використання плазми низького тиску, яка ініціює іонізацію молекул забруднюючих речовин, що призводить до їх розкладу на безпечні компоненти. [14] Ці методи демонструють високий рівень ефективності для токсичних газових сполук, але через значні енергетичні витрати та складність обслуговування їхнє застосування обмежене високотехнологічними підприємствами.

Вибір системи пилогазоочистки залежить не лише від її ефективності, а й від капітальних та експлуатаційних витрат. Різні методи мають свої переваги та недоліки щодо витрат на встановлення, обслуговування, енергоспоживання та викиди відходів.

Сухі методи, такі як циклонні установки, мають відносно низькі капітальні витрати, оскільки їх конструкція проста, а експлуатаційні витрати мінімальні. Проте ефективність очищення грубодисперсного пилу не перевищує 95%, що може потребувати встановлення додаткових фільтраційних систем [7].

Рукавні фільтри забезпечують високий рівень очищення (до 99,9%), однак потребують значних витрат на обслуговування. Фільтруючі елементи мають обмежений ресурс роботи і потребують регулярної заміни, що збільшує експлуатаційні витрати. [12] Це особливо актуально для підприємств із високим рівнем запиленості повітря, де заміна фільтрів може здійснюватися щомісяця.

Електрофільтри, попри високу ефективність (99% і більше), вимагають значних капітальних витрат на встановлення та високі витрати на електроенергію. Крім того, для ефективної роботи необхідний регулярний контроль стану електродів та системи збору осаду [8].

Мокрі методи очищення, такі як скрубери, забезпечують ефективне видалення не тільки твердих частинок, а й газових забруднень, однак потребують значних витрат на воду та її утилізацію. Деякі підприємства вирішують цю проблему шляхом встановлення систем рециркуляції води, що дозволяє зменшити витрати на її споживання [13].

Плазмокatalітичні установки та інші інноваційні технології відзначаються високою ефективністю очищення, особливо при роботі з токсичними газами та дрібнодисперсним пилом. Однак їхнє впровадження потребує значних фінансових ресурсів через високу вартість обладнання та споживання електроенергії. Подібні технології поки що обмежені для використання на широкому промисловому рівні через значні інвестиційні витрати, хоча перспективи їх розвитку залишаються високими [14].

Сучасні технології пилогазоочистки спрямовані не лише на підвищення ефективності очищення, а й на впровадження автоматизованих систем контролю, які дозволяють у режимі реального часу оцінювати рівень забруднення та регулювати параметри роботи обладнання. Інтелектуальні системи моніторингу викидів поєднують

аналітичні методи контролю, IoT-технології та машинне навчання, що дозволяє зменшити вплив людського фактора та підвищити точність вимірювань.

Однією з основних складових таких систем є сенсори пилу та газових домішок, які встановлюються на різних етапах очищення та дозволяють визначати концентрацію частинок у повітрі. Ці датчики працюють за допомогою лазерного розсіювання або електрохімічного аналізу газового потоку. Зібрані дані передаються на центральний сервер або у хмарну систему управління, де вони аналізуються у реальному часі [15].

Важливою функцією сучасних систем моніторингу є прогнозування перевищення граничнодопустимих концентрацій забруднень. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє аналізувати історичні дані та визначати закономірності, які можуть вказувати на можливість несправностей у фільтраційних установках або погіршення якості очищення [16]. Це дає можливість підприємствам завчасно здійснювати профілактичне обслуговування обладнання, зменшуючи ризик аварійних ситуацій [11].

Автоматизовані системи моніторингу викидів також забезпечують інтеграцію з державними екологічними службами. У деяких країнах, таких як Німеччина, Китай та США, екологічне законодавство вимагає обов'язкової передачі даних у державні системи контролю забруднення атмосфери. Це дозволяє органам екологічного нагляду оперативно реагувати на перевищення норм викидів та вживати необхідних заходів для усунення порушень. У межах таких програм підприємства можуть отримувати штрафи за порушення нормативів або, навпаки, фінансові стимули за зменшення рівня забруднення. [17]

Впровадження інтелектуальних систем контролю викидів сприяє не лише покращенню екологічної ситуації, а й економії ресурсів підприємства. Оптимізація роботи систем пилогазоочистки дозволяє

знизити енергоспоживання за рахунок автоматичного регулювання параметрів роботи обладнання відповідно до поточного рівня забруднення. Завдяки цьому підприємства можуть зменшити витрати на обслуговування та продовжити термін служби фільтраційних установок [18].

Таблиця 1.3 – Порівняння традиційного та автоматизованого контролю викидів

Параметр	Традиційний контроль	Автоматизований контроль
Точність вимірювань	Середня (10-20% похибки)	Висока (до 5% похибки)
Час реакції на перевищення норм	До кількох годин	Миттєва реакція (в режимі реального часу)
Необхідність ручного втручання	Постійний нагляд оператора	Мінімальне втручання
Можливість прогнозування	Відсутня	Присутня (алгоритми машинного навчання)
Інтеграція з державними системами	Можливе періодичне звітування	Безперервний онлайн-моніторинг

Джерело: розроблено автором на основі [19-20].

Сучасні дослідження в галузі пилогазоочистки зосереджені на вдосконаленні існуючих технологій та розробці нових методів, що забезпечують вищу ефективність очищення при мінімальних енергетичних витратах. Наукові роботи спрямовані на аналіз ефективності традиційних методів, вивчення можливостей їх комбінованого застосування, а також впровадження інноваційних рішень.

Аналіз ефективності різних методів показав, що циклонні установки ефективні для уловлення крупнодисперсного пилу (>10 мкм), однак для дрібнодисперсного пилу їх ефективність знижується до 75-

85%. Це вимагає використання комбінованих методів, таких як поєднання циклону з рукавними фільтрами або електрофільтрами [7].

Рукавні фільтри забезпечують ефективність очищення до 99,9%, проте дослідження показують, що значний вплив на їхню роботу мають вологість та температура газового потоку. При підвищеній вологості можливе налипання частинок пилу на фільтрувальну тканину, що скорочує термін служби фільтрів [12].

Дослідження електрофільтрів демонструють, що ефективність очищення може досягати 99% навіть для частинок менше 1 мкм, однак на ефективність роботи впливають такі фактори, як питомий електричний опір пилу та характеристики газового середовища. Висока ефективність електрофільтрів у порівнянні з механічними методами забезпечує їх широке застосування на підприємствах із високими вимогами до якості очищення [8].

Мокрі методи очищення, зокрема скрубери, ефективно уловлюють частинки розміром до 5 мкм. Проте дослідження вказують, що вони можуть створювати вторинні забруднення через утворення відпрацьованих рідких відходів. Тому сучасні підходи передбачають використання систем повторного використання води та каталітичного очищення стічних вод [9].

Інноваційні технології, такі як плазмокatalітичні установки, активно досліджуються як перспективні рішення для очищення газів від найдрібніших частинок та токсичних газових сполук. Вони дозволяють нейтралізувати хімічні домішки шляхом розщеплення їх молекулярної структури під впливом плазми, що значно підвищує якість очищення. Проте їх широкомасштабне впровадження поки що обмежене високими витратами на обладнання та експлуатацію [21].

Останні дослідження також зосереджені на використанні математичного моделювання для прогнозування ефективності різних методів очищення залежно від характеристик газового потоку.

Використання комп'ютерних симуляцій дозволяє визначити оптимальні режими роботи пилоочисних установок, що дає змогу знизити енергетичні витрати та збільшити продуктивність системи очищення [16].

Розвиток технологій пилогазоочистки визначається необхідністю відповідності сучасним екологічним стандартам, підвищенням ефективності очищення та зниженням експлуатаційних витрат. Останні дослідження зосереджені на впровадженні інноваційних матеріалів, автоматизації процесів очищення та інтеграції систем повторного використання енергоресурсів.

Однією з ключових тенденцій є використання нових фільтраційних матеріалів, зокрема мембранних фільтрів на основі наноматеріалів. Дослідження показують, що нанопористі фільтрувальні мембрани дозволяють значно підвищити ефективність очищення завдяки високій селективності та збільшенню площі уловлення частинок пилу. Такі матеріали забезпечують стабільну роботу систем очищення навіть при високих температурах і підвищеній вологості, що робить їх перспективними для використання в промислових умовах [3].

Ще одним напрямом розвитку є інтеграція систем рекуперації тепла в процеси пилогазоочистки. Відпрацьоване повітря після очищення містить значний запас теплової енергії, яка може бути повторно використана для нагріву технологічних потоків або генерації електроенергії. Використання рекуперативних теплообмінників дозволяє зменшити енергетичні витрати підприємств та підвищити загальну ефективність виробництва. Дослідження підтверджують, що впровадження таких систем може знизити загальні витрати на електроенергію на 10-15% [2].

Важливим напрямом є впровадження гібридних систем очищення, які поєднують переваги кількох методів. Наприклад, поєднання електрофільтрів із мокрими скруберами дозволяє одночасно

затримувати як тверді частинки, так і газові домішки, що значно підвищує загальну ефективність систем очищення [8]. Такі комбіновані установки можуть адаптуватися до змін складу газового потоку та забезпечують гнучкість у використанні для різних виробничих процесів.

Окрім технічних аспектів, перспективи розвитку галузі пов'язані з цифровізацією процесів очищення та автоматичним контролем забруднень. Використання великих даних (Big Data) у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволяє прогнозувати зміни у складі викидів та оптимізувати режими роботи фільтраційного обладнання [22]. Це сприяє не лише покращенню якості очищення, але й зменшенню витрат на експлуатацію.

У перспективі можливе широке впровадження каталітичних методів очищення, які дозволяють не лише видаляти тверді частинки, а й нейтралізувати небезпечні газові домішки. Каталізатори на основі оксидів металів уже використовуються в системах очищення вихлопних газів автотранспорту, проте їхнє застосування у промисловості ще потребує доопрацювання для забезпечення стабільної роботи у широкому діапазоні температур і вологості [5].

Таким чином, сучасні технології пилогазоочистки представлені широким спектром методів, які забезпечують ефективне видалення твердих частинок із промислових викидів. Найбільш поширеними є сухі методи, що включають циклонні установки, рукавні фільтри та електрофільтри. Вони характеризуються високою ефективністю для певних фракцій пилу, проте можуть вимагати значних експлуатаційних витрат або комбінування з іншими методами для досягнення необхідного рівня очищення.

Мокрі методи очищення, такі як скрубери та Вентурі-системи, мають перевагу у видаленні як пилу, так і газових домішок, але створюють додаткове навантаження на водні ресурси та потребують систем утилізації стічних вод. Комбіновані рішення дозволяють

отримати високу ефективність очищення, проте їх впровадження часто вимагає значних фінансових вкладень.

Розвиток сучасних технологій пилогазоочистки спрямований на автоматизацію систем моніторингу та контролю викидів, використання штучного інтелекту для оптимізації параметрів очищення, а також інтеграцію енергоефективних рішень, таких як рекуперація тепла. Новітні дослідження свідчать про перспективність впровадження мембранних фільтрів, плазмокаталітичних установок та гібридних систем очищення, що дозволяють досягти більш високого рівня ефективності при знижених експлуатаційних витратах.

Таким чином, вибір конкретного методу пилогазоочистки залежить від особливостей промислового виробництва, розміру частинок пилу, вимог до екологічної безпеки та економічної доцільності впровадження. Подальші дослідження у цій сфері сприятимуть розробці більш ефективних та екологічно безпечних технологій очищення повітря.

1.2. Основні джерела пилогазових викидів та їхній вплив на довкілля.

Пилогазові викиди є одним із головних факторів забруднення атмосфери, що спричиняють негативний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей. Вони формуються внаслідок технологічних процесів на промислових підприємствах, під час спалювання палива, роботи транспорту та інших джерел антропогенного походження. Основними складовими таких викидів є тверді частинки пилу, аерозолі та газові сполуки, які містять оксиди азоту, сірки, вуглецю, важкі метали та інші токсичні речовини.

Джерела пилогазових викидів можна умовно поділити на природні та антропогенні. Природні джерела включають виверження вулканів,

лісові пожежі, пилові бурі та розвіювання ґрунтових частинок вітром. Проте найбільший внесок у забруднення атмосфери здійснює людська діяльність. В таблиці 1.4 вказані основні антропогенні джерела пилогазових викидів.

Таблиця 1.4 – Основні антропогенні джерела пилогазових викидів та їхні характеристики

Галузь	Основні джерела викидів	Склад викидів
Металургія	Виплавка металів, доменне виробництво, переробка руд	Оксиди металів ( $Fe_2O_3$ , $ZnO$ , $PbO$ ), дрібнодисперсний пил, важкі метали
Енергетика	ТЕС (вугілля, газ, мазут), нафтові установки	Оксиди азоту та сірки, $CO_2$ , зольні частинки, сажа
Хімічна промисловість	Виробництво добрив, пластмас, кислот, спалювання відходів	Сірководень, хлор, аміак, токсичні аерозолі, органічні леткі сполуки
Будівництво	Виробництво цементу, бетону, мінеральних матеріалів	Кремнеземний пил, цементний пил, оксиди кальцію
Транспорт	Вихлопні гази, зношування шин та гальм, згоряння пального	Оксиди азоту, вуглеводні, $CO$ , пил

Джерело: розроблено автором на основі [23]

Як видно з таблиці, антропогенні джерела поділяються на кілька основних категорій:

1. Металургійна промисловість – під час виплавки металів, плавлення руд та лиття утворюються великі обсяги пилових частинок, що містять важкі метали та оксиди металів. Викиди можуть містити токсичні сполуки, такі як оксид свинцю, кадмію та ртуті.

2. Енергетичний сектор – спалювання викопного палива (вугілля, мазуту, газу) на теплоелектростанціях супроводжується утворенням великих обсягів твердих частинок, а також викидом вуглекислого газу, оксидів азоту та сірки.
3. Хімічна промисловість – у процесах виробництва кислот, добрив, пластмас та інших хімічних сполук виділяються газоподібні викиди, що містять сірчистий ангідрид, аміак, хлор та інші небезпечні речовини.
4. Будівельний сектор – виробництво цементу, бетону та обробка мінеральних матеріалів генерують значні обсяги пилу, що складається з кремнезему та інших твердих частинок.
5. Транспортний сектор – автомобільний транспорт є джерелом пилу та токсичних газових викидів, включаючи оксиди азоту, монооксид вуглецю та тверді частинки, що утворюються в результаті зношування шин і гальмівних колодок.

Негативний вплив пилогазових викидів на довкілля та здоров'я людини визначається хімічним складом, розміром частинок і концентрацією забруднюючих речовин. Основні екологічні та медичні наслідки пов'язані з наявністю в атмосфері дрібнодисперсного пилу (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), важких металів, оксидів сірки (SO<sub>2</sub>) та азоту (NO<sub>x</sub>), монооксиду вуглецю (CO) та органічних летких сполук.

Дрібнодисперсний пил є особливо небезпечним для здоров'я, оскільки частинки PM<sub>2.5</sub> можуть проникати в легені та кровоносну систему, викликаючи хронічні захворювання дихальної системи, серцево-судинні хвороби та онкологічні ризики. Підвищена концентрація цих частинок спричиняє астму, бронхіти, зниження легеневої функції, а також впливає на загальну тривалість життя населення у промислових регіонах. [24]

Оксиди сірки та азоту реагують з водяною парою в атмосфері, утворюючи кислотні дощі, які спричиняють деградацію ґрунтів,

руйнування будівельних матеріалів та пошкодження рослинного покриву. Токсичні метали, такі як свинець, ртуть, кадмій та миш'як, мають властивість накопичуватися в організмі людини, викликаючи нейротоксичні ефекти, порушення функцій нирок, печінки та імунної системи. [25]

Забруднення атмосферного повітря також впливає на кліматичні умови, сприяючи утворенню смогу, що знижує якість повітря у містах. Дослідження показують, що в районах з високим рівнем промислових викидів частота респіраторних захворювань зростає на 30-40% порівняно з екологічно чистими територіями [26].

Систематичний моніторинг стану атмосферного повітря, зменшення обсягів шкідливих викидів та впровадження ефективних технологій очищення газів є ключовими заходами для мінімізації впливу пилогазових забруднень. Застосування сучасних систем фільтрації дозволяє значно знизити концентрацію шкідливих речовин у атмосфері, покращити якість повітря та зменшити екологічні ризики. Таблиця 1.5 показує основні види забруднюючих речовин, їх джерела та вплив на організм людини.

Як видно, найбільш небезпечними є дрібнодисперсний пил, важкі метали та газові домішки, що можуть викликати серйозні захворювання та довготривалі токсичні наслідки. Пилогазові викиди не лише спричиняють безпосередні проблеми для здоров'я людини, а й викликають довготривалі екологічні зміни. Основними негативними наслідками таких викидів є забруднення повітря, водних ресурсів та ґрунтів, що сприяє глобальним кліматичним змінам і погіршенню життєвих умов.

Таблиця 1.5 – Основні забруднюючі речовини та їх вплив на здоров'я людини

Забруднююча речовина	Джерела утворення	Вплив на здоров'я
Дрібнодисперсний пилю (PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> )	Промислові процеси, згоряння палива, транспорт	Захворювання дихальної системи, бронхіти, астма, серцево-судинні хвороби
Оксиди сірки (SO <sub>2</sub> )	Спалювання вугілля, нафтопродуктів, хімічна промисловість	Кислотні дощі, подразнення слизових оболонок, ураження легень
Оксиди азоту (NO <sub>x</sub> )	Вихлопні гази, енергетика, металургія	Токсичний вплив на органи дихання, ризик серцево-судинних захворювань
Монооксид вуглецю (CO)	Неповне згоряння палива, автомобільний транспорт	Зниження рівня кисню в крові, головний біль, порушення роботи мозку
Важкі метали (Pb, Hg, Cd, As)	Металургія, гірничодобувна промисловість, відходи виробництва	Накопичення в організмі, токсичний вплив на нервову систему, нирки, печінку

Джерело: розроблено автором на основі [23-26]

Однією з найбільших екологічних проблем, пов'язаних із пилогазовими викидами, є утворення смогу. Цей феномен особливо небезпечний у густонаселених містах, де висока концентрація оксидів азоту та летких органічних сполук призводить до фотохімічних реакцій, утворюючи токсичний туман, що перешкоджає нормальному газообміну в атмосфері. Смог негативно впливає на стан здоров'я населення, викликаючи респіраторні та серцево-судинні захворювання, а також знижує рівень видимості, що підвищує ризик дорожньо-транспортних пригод. [27]

Утворення кислотних дощів, які виникають внаслідок взаємодії оксидів сірки ( $\text{SO}_2$ ) та азоту ( $\text{NO}_x$ ) з водяною парою в атмосфері. Ці сполуки утворюють сірчану та азотну кислоти, що випадають у вигляді кислотних опадів, спричиняючи деградацію ґрунтів, зниження врожайності сільськогосподарських культур, руйнування будівельних конструкцій і загибель водних екосистем.

Крім того, значні обсяги пилу та аерозолів у повітрі можуть впливати на кліматичні процеси, змінюючи баланс відбиття та поглинання сонячної радіації. Деякі дрібні частинки відбивають сонячне світло назад у космос, що може спричинити тимчасове охолодження в певних регіонах, однак більшість забруднюючих газів, зокрема  $\text{CO}_2$  та  $\text{CH}_4$ , сприяють парниковому ефекту та загальному підвищенню температури атмосфери.

Забруднення водних ресурсів також є значною проблемою, оскільки атмосферні забруднювачі осідають у річках, озерах та океанах. Важкі метали та токсичні сполуки, які містяться у викидах промислових підприємств, можуть накопичуватися у водних організмах, що призводить до отруєнь та біоаккумуляції небезпечних речовин у харчовому ланцюгу. Спостерігається зниження родючості ґрунтів, особливо в регіонах, де відбувається інтенсивне випадання промислового пилу. Забруднення ґрунтів важкими металами та кислотними сполуками порушує мікробіологічний склад і структуру землі, що може призвести до значного зниження продуктивності сільського господарства та ерозії.

Для мінімізації впливу пилогазових викидів на довкілля необхідно впроваджувати сучасні технології очищення газових потоків, а також розвивати стратегії зниження шкідливих викидів у промисловості, енергетиці та транспортному секторі. Використання ефективних систем моніторингу якості повітря, а також впровадження екологічно безпечних технологій дозволять значно зменшити обсяги шкідливих речовин у

атмосфері та покращити загальний екологічний стан. У Таблиці 1.6 наведено основні напрями зниження шкідливих викидів, що дозволяють мінімізувати екологічний вплив та підвищити ефективність очищення повітря.

Таблиця 1.6 – Напрями зниження пилогазових викидів

Категорія заходів	Опис
Використання чистих технологій	Перехід на електродугові печі, використання природного газу замість вугілля, закриті виробничі цикли для мінімізації викидів.
Автоматизація виробничих процесів	Впровадження інтелектуальних систем моніторингу, IoT-рішень, ШІ та Big Data для аналізу і регулювання рівня викидів у реальному часі.
Перехід на циркулярну економіку	Вторинне використання пилових залишків, каталітичні процеси переробки газів, впровадження систем рекуперації тепла для зменшення енергетичних втрат.
Зміни у транспортній системі	Перехід на електротранспорт, альтернативні види палива (водень, біогаз), оптимізація логістики для скорочення викидів від транспорту.
Державне регулювання та міжнародні стандарти	Введення квот на викиди, екологічні податки, впровадження сертифікацій ISO 14001, міжнародні екологічні угоди (Паризька угода, Європейський "Зелений курс").

Джерело: розроблено автором на основі [28-30]

Як видно з таблиці 1.6, зниження пилогазових викидів може відбуватися двома основними шляхами:

1. Мінімізація утворення забруднень ще на стадії виробництва (чисті технології, циркулярна економіка).
2. Ефективний контроль та очищення (автоматизація моніторингу, регулювання викидів, перехід на екологічний транспорт).

Особливу увагу слід приділяти використанню відновлюваних джерел енергії та переробці газових залишків у корисні продукти. Впровадження енергоефективних технологій та екологічного транспорту може значно скоротити рівень забруднення в містах і промислових районах.

Однак важливо враховувати, що жоден із методів не є універсальним рішенням. Оптимальна стратегія боротьби із забрудненням включає поєднання кількох технологій, що дозволяє досягти найкращих результатів з точки зору економічної ефективності та екологічної безпеки.

### 1.3. Огляд існуючих методів очищення

Очищення пилогазових викидів є однією з основних задач екологічної безпеки промислових підприємств. Для ефективного зменшення концентрації забруднюючих речовин застосовуються різноманітні методи очищення, що базуються на механічних, фільтраційних, мокрих, електрофізичних та комбінованих процесах. Вибір технології залежить від таких ключових факторів, як розмір частинок пилу, хімічний склад газових домішок, температура газового потоку та вимоги екологічного законодавства.

Сучасні методи очищення пилогазових викидів можна поділити на кілька основних груп, що відрізняються за принципом дії, ефективністю та експлуатаційними витратами, а саме:

1. Механічні методи. До цієї категорії належать гравітаційні камери, циклонні установки, інерційні осаджувачі, що працюють за рахунок сили тяжіння або відцентрових сил. Вони ефективно видаляють великі частинки пилу (10–100 мкм), проте їх ефективність значно знижується для дрібнодисперсного пилу (менше 5 мкм).

2. Фільтраційні методи. Найбільш розповсюдженими є рукавні фільтри, що забезпечують ефективність очищення понад 99%. Вони використовуються в галузях із високими вимогами до чистоти газового потоку. Однак їх недоліком є потреба у періодичній заміні фільтруючих елементів і висока експлуатаційна вартість.
3. Скрубери, Вентурі-скрубери та інші мокрі системи працюють за рахунок контакту газового потоку з рідиною, що дозволяє одночасно очищати гази від пилу та шкідливих хімічних сполук. Вони забезпечують високий рівень очищення (до 98%), але створюють проблему утилізації рідких відходів.
4. Електрофільтри – це методи електростатичного очищення, що застосовуються у випадках, коли необхідно видаляти дрібнодисперсний пил (0,1–2 мкм). Вони мають ефективність до 99%, але потребують значних капіталовкладень і високих енергетичних витрат.
5. Комбіновані методи – це поєднання різних технологій, наприклад, циклони + рукавні фільтри або електрофільтри + скрубери, дозволяє досягти максимального рівня очищення (99,9%), проте є дорогими у впровадженні та складними в експлуатації.

У Таблиці 1.7 представлено порівняння основних методів очищення пилогазових викидів за основними критеріями.

Як видно з Таблиці 1.7, кожен метод очищення пилогазових викидів має свої переваги та обмеження, які визначають сферу його застосування. Наприклад, механічні системи, такі як гравітаційні камери та циклони, є економічними, проте їх ефективність значно знижується для дрібнодисперсного пилу. Натомість рукавні фільтри та електрофільтри забезпечують ефективність на рівні 99%, але потребують значних витрат на обслуговування та експлуатацію.

Щоб наочно продемонструвати ефективність різних методів очищення, на рисунку 1.1 представлено порівняння рівня уловлення пилу для кожного типу технології. Це дозволяє оцінити, які методи є найбільш доцільними для використання залежно від характеру пилогазових викидів.

Таблиця 1.6 – Порівняння методів очищення пилогазових викидів

Метод очищення	Типові забруднення	Основні переваги	Основні недоліки
Гравітаційні камери	Великі частинки пилу (>50 мкм)	Простота конструкції, низькі витрати, довговічність, не потребують електроенергії	Низька ефективність для дрібного пилу, великі розміри установки
Циклони	Пил 10–100 мкм	Висока ефективність для крупнодисперсного пилу, низькі експлуатаційні витрати, компактність	Погана ефективність для частинок <10 мкм, створюють високий опір потоку газу
Рукавні фільтри	Дрібний пил (2–10 мкм)	Висока ефективність очищення, можливість уловлення дрібнодисперсного пилу, відповідність екологічним нормам	Високі експлуатаційні витрати, необхідність заміни фільтрів, чутливість до вологості
Скрубери	Пил, газоподібні домішки	Одночасне очищення від пилу і газових забруднень, ефективність у	Високі витрати води, утворення забруднених стоків,

		широкому діапазоні температур	корозійний вплив на обладнання
Електрофільтри	Дрібнодисперсний пил (<2 мкм)	Ефективність для дрібного пилу, мінімальні викиди вторинного забруднення, підходить для високотемпературних газів	Висока вартість обладнання, енерговитрати, необхідність регулярного очищення електродів
Комбіновані системи	Пил, газові сполуки	Максимальна ефективність, адаптивність до змінних умов роботи, здатність до очищення складних газових потоків	Складність у обслуговуванні, висока вартість впровадження, великі капітальні витрати

Джерело: розроблено автором на основі [31-33]

Щоб наочно продемонструвати ефективність різних методів очищення, на рисунку 1.1 представлено порівняння рівня уловлення пилу для кожного типу технології. Це дозволяє оцінити, які методи є найбільш доцільними для використання залежно від характеру пилогазових викидів.



Рисунок 1.1 – Порівняння рівня уловлення пилу для різних типів пилоловлення

Як видно з на рисунку 1.1, ефективність уловлення пилу значно варіюється залежно від типу пилоловлення. Гравітаційні камери та циклони ефективно працюють із крупнодисперсними частинками, проте їх ефективність суттєво знижується для дрібнодисперсного пилу. Рукавні фільтри та електрофільтри забезпечують високу якість очищення, навіть для частинок розміром менше 2,5 мкм, але їх експлуатаційні витрати є значними. Скрубери, завдяки комбінованому механізму уловлення частинок у рідкому середовищі, є ефективними не лише для пилу, а й для газових домішок, хоча водоспоживання та утворення вторинних забруднень можуть створювати додаткові екологічні проблеми.

Найбільш ефективним є поєднання декількох методів очищення, що дозволяє компенсувати недоліки кожного окремого способу. Наприклад, використання циклонів у поєднанні з рукавними фільтрами зменшує навантаження на фільтрувальні елементи, а електрофільтри разом зі скруберами забезпечують очищення не лише від пилу, а й від шкідливих газоподібних компонентів.

Проведений аналіз підтверджує, що вибір технології очищення має базуватися не лише на її ефективності, а й на економічних та

екологічних факторах, таких як витрати на експлуатацію, можливість інтеграції у виробничий процес та відповідність екологічним нормам.

Таким чином, можна зробити висновок, що ефективна система пилогазоочистки має враховувати комплексні підходи до очищення викидів. Узагальнення отриманих результатів дозволяє перейти до наступного етапу дослідження – аналізу ефективності існуючої системи очищення на підприємстві та пошуку шляхів її вдосконалення.

#### 1.4 Висновки до Розділу 1

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану технологій пилогазоочистки, визначено основні джерела пилогазових викидів та розглянуто існуючі методи очищення. Це дозволило отримати комплексне уявлення про особливості роботи систем очищення, їх ефективність, а також екологічні та економічні аспекти їх використання.

На основі аналізу сучасних технологій встановлено, що методи очищення пилогазових викидів можна класифікувати як механічні, фільтраційні, мокрі, електрофізичні та комбіновані. Механічні методи (гравітаційні камери, циклони) є ефективними для крупнодисперсного пилу, проте малоефективні для частинок менше 10 мкм. Фільтраційні методи, зокрема рукавні фільтри, забезпечують ефективність очищення понад 99%, але мають високі експлуатаційні витрати. Мокрі методи (скрубери, Вентурі-скрубери) здатні одночасно очищати гази від пилу та газових домішок, однак потребують утилізації стічних вод. Електрофільтри дозволяють ефективно видаляти дрібнодисперсний пил, проте мають високу енергетичну затратність. Найкращі результати показують комбіновані системи, які поєднують різні технології очищення, але потребують значних капіталовкладень.

Досліджено основні джерела пилогазових викидів, серед яких домінують промислові підприємства, енергетичний сектор, будівельна

індустрія та транспорт. Найбільшу небезпеку становлять дрібнодисперсні частинки (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), важкі метали (Pb, Cd, Hg), оксиди сірки (SO<sub>2</sub>) та азоту (NO<sub>x</sub>). Їх вплив на довкілля проявляється у вигляді забруднення повітря, кислотних дощів, накопичення токсичних речовин у водних екосистемах, а також значного негативного впливу на здоров'я людини.

Аналіз існуючих методів очищення показав, що незважаючи на високий рівень ефективності сучасних технологій, вони мають певні недоліки, зокрема економічні, технологічні та екологічні обмеження. Наприклад, механічні системи малоефективні для дрібного пилу, рукавні фільтри потребують регулярної заміни фільтруючих елементів, а мокрі методи супроводжуються утворенням забруднених стічних вод. Електрофільтри, хоча й забезпечують високу ефективність, мають значні енергетичні витрати.

Таким чином, у межах подальшого дослідження необхідно оцінити ефективність існуючої системи пилогазоочищення на підприємстві, розглянути можливості її модернізації, а також визначити економічну доцільність впровадження нових технологій для підвищення ефективності очищення викидів.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПИЛОГАЗООЧИСТКИ НА МЕТИЗНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

### 2.1 Небезпечні та шкідливі фактори в виробничих умовах метизного підприємства

Завод МЕТИЗ – українське підприємство, яке спеціалізується на виробництві високоякісних металевих виробів, зокрема дроту та цвяхів. Завод розташований у місті Кам'янське, Дніпропетровської області, що забезпечує зручне розташування для логістики продукції по всій Україні та за її межами. Продукція заводу користується попитом не лише на внутрішньому ринку, але й серед клієнтів у Європі, зокрема в Польщі, Угорщині, Словаччині, Німеччині, Італії та інших країнах ЄС. [35]

ТДВ Завод «Метиз» є підприємством з багаторічною історією, яка почалася у 1963 році в місті Дніпродзержинськ (нині Кам'янське). Спеціалізуючись на виробництві металовиробів, підприємство постійно розвивалося, модернізувало свої виробничі потужності та впроваджувало сучасні технології.

У 1995 році в результаті приватизації на базі підприємства було створено акціонерне товариство «Завод Метиз». Через рік, у 1996 році, завод почав випускати дріт ВР-1, який до сьогодні є одним із ключових продуктів підприємства.

Протягом наступних років завод продовжував активно розширювати асортимент продукції та вдосконалювати технологічні процеси. У 2004 році було створено ділянку для виготовлення шиферних цвяхів. У 2005 році введено в експлуатацію цех мокрого волочіння для виробництва дроту з меншим діаметром, а в 2006 році встановлено сучасну піч для термічної обробки, що сприяло підвищенню якості готової продукції.

У 2007 році завод досяг статусу найбільшого виробника цвяхів в Україні, виробляючи до 600 тонн продукції на місяць. У 2008 році загальні обсяги виробництва сягнули 6000 тонн на місяць, що стало значним досягненням у розвитку підприємства.

У 2022 році було розширено парк правильно-відрізних верстатів, а у 2023 році впроваджено нову систему безперервного знімання дроту, а також освоєно випуск дроту в мотках типу «розет». Ці кроки дозволили заводу підвищити продуктивність і відповідати сучасним вимогам ринку. [36]

Протягом всієї своєї історії завод «Метиз» демонстрував здатність адаптуватися до нових викликів та підтримувати високі стандарти якості у виробництві.

Асортимент заводу включає широкий вибір дроту та цвяхів, які знаходять застосування у будівництві, машинобудуванні, сільському господарстві та інших галузях. Вся діяльність підприємства побудована на комплексній системі контролю якості, яка включає перевірку сировини на вході, контроль на всіх етапах виробництва та перевірку готової продукції. Завдяки цьому підходу завод гарантує високі стандарти якості та задоволеність клієнтів.

Підприємство активно інвестує в модернізацію обладнання, що дозволяє підтримувати конкурентоспроможність на міжнародному ринку. Використання сучасних технологій і матеріалів забезпечує виготовлення продукції з високими експлуатаційними характеристиками, що відповідає потребам найвимогливіших клієнтів.

У 2023 році фінансове становище ТОВ «Завод Метиз Кам'янське» демонструвало позитивну динаміку. Дохід підприємства склав 36 537 000 грн, що майже вдвічі перевищує показник 2021 року (17 088 200 грн). Чистий прибуток зріс до 768 600 грн, порівняно з 328 500 грн у 2021 році. Активи заводу становили 20 241 600 грн, а зобов'язання – 13 999 000 грн, що свідчить про фінансову стабільність. Також відзначено

зростання кількості працівників – з 30 осіб у 2021 році до 50 осіб у 2023 році [37]. Вище зазначені показники вказують на впевнене зростання підприємства, його здатність збільшувати прибутковість та підтримувати стабільний розвиток на ринку.

Метизне виробництво також пов'язане з утворенням шкідливих викидів та чинників, які можуть негативно впливати на довкілля та здоров'я працівників.

Джерела викидів і шкідливих факторів на метизному підприємстві охоплюють широкий спектр впливів, обумовлених особливостями технологічних процесів. Пилові викиди, що утворюються на різних етапах виробництва, газові викиди виникають переважно під час термічної обробки дроту. Використання хімічних речовин, таких як сірчана та соляна кислоти для очищення металу можуть спричинити утворення летких органічних сполук, які забруднюють повітря і воду.

Термічні фактори, зумовлені високими температурами у печах та інших термічних установках, викликають локальне нагрівання повітря у виробничих приміщеннях, ускладнюючи умови роботи та збільшуючи енергоспоживання. Окалина, шлам і обрізки дроту, утворюються у значних обсягах, що за відсутності належної утилізації призводить до накопичення на території підприємства та подальшого забруднення ґрунту та водоносних горизонтів. Робота дробеметних установок, волочильних станів та іншого обладнання створює постійний шум і вібрацію, що негативно впливає на здоров'я працівників. Тривала дія високого рівня шуму, який перевищує 80 дБ, може спричинити професійні захворювання, зокрема приглухуватість [38].

Найбільша з проблем на метизному виробництві, є утворення пилу. Джерела пилових викидів безпосередньо пов'язані з технологічними процесами, які включають механічну та термічну обробку металу. Причини виникнення пилу можна пояснити особливостями цих процесів. Очищення металевого напівфабрикату,

зокрема катанки, від окалини, є одним із перших етапів технологічного циклу. Механічні методи очищення, такі як використання дробеметних установок, генерують значну кількість пилу, що складається з частинок окалини та металу. Ці частинки відокремлюються від поверхні металу під впливом високошвидкісного удару абразивного матеріалу або механічного тертя, що створює дрібнодисперсний пил.

Наступним джерелом пилу є процес волочіння дроту. Під час цього процесу металевий напівфабрикат протягується через спеціальні волокни, що зменшують його діаметр до необхідного розміру. Інтенсивне тертя між дротом і поверхнею волоків спричиняє зношування металу, а отже, утворення дрібних частинок, які потрапляють у повітря.

Особливої уваги заслуговує той факт, що більшість пилу на метизному виробництві має металеву природу. Дисперсні частинки заліза є не лише небезпечними для працівників, оскільки можуть осідати в легенях і викликати респіраторні захворювання, але й становлять загрозу для навколишнього середовища. Осідання пилу на поверхнях може спричинити забруднення ґрунту і рослинності важкими металами, а потрапляння його у водні ресурси може погіршувати їхню якість.

Причини виникнення пилу також можна пояснити недоліками у технологічному обладнанні або його старінням. На підприємствах, що використовують старе обладнання та системи пилогазоочистки часто мають недостатню ефективність для уловлювання дрібнодисперсного пилу. Це спричиняє підвищену концентрацію пилу у виробничих приміщеннях, що негативно впливає на умови праці.

Загалом проблема пилових викидів на метизному виробництві є комплексною і вимагає системного підходу для її вирішення. Основними шляхами мінімізації цієї проблеми є модернізація обладнання, вдосконалення технологічних процесів і впровадження ефективних систем пилогазоочистки, які дозволять значно зменшити вплив пилу на

працівників і навколишнє середовище.

## 2.2. Технічний стан циклону ЦН-11-630-1У та його експлуатаційні характеристики на метизному підприємстві

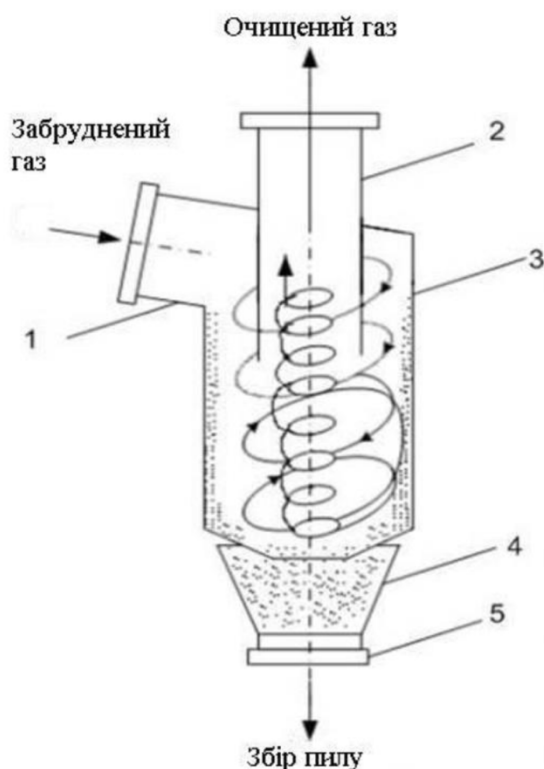
Аналіз існуючих проблем на заводі «Метиз» виявив, що основні виклики підприємства пов'язані із застарілим обладнанням пиловловлення та значними витратами на енергоресурси. Наприклад, циклонні пиловловлювачі, які застосовуються для очищення повітря, мають низьку ефективність при уловлюванні дрібнодисперсного пилу. На підприємстві використовуються пиловловлювачі типу "Циклон", а саме ЦН-11-630-1У (Циліндричний циклон).

Циклон ЦН-11-630-1У є одним із найбільш поширених типів пиловловлювачів, що використовуються на промислових підприємствах для очищення газових потоків від пилу. Ця модель належить до групи інерційних пиловловлювачів, де основний принцип роботи базується на використанні відцентрових сил для відокремлення твердих частинок з потоку забрудненого газу.

На підприємстві "ЗАВОД МЕТИЗ" циклони серії ЦН-11-630-1У застосовуються для очищення газопилових викидів, що утворюються під час механічної та термічної обробки металевих заготовок. Основними джерелами пилу є дробеметні установки, волочильні стани, термічні печі, де утворюються дрібнодисперсні металеві частинки, що можуть мати негативний вплив як на працівників, так і на навколишнє середовище.

Циклонні пиловловлювачі працюють за принципом відцентрового розділення твердих частинок із газового потоку. Цей метод базується на використанні інерційних сил, які змушують частинки пилу осідати на стінках циклону, після чого вони потрапляють у збірний бункер. На

Рисунку 2.1 показана принципова схема будови та дії Циклона.



1 – вхідний патрубков; 2 – вихлопна труба; 3 – корпус; 4– пилоосаджувальний бункер; 5 – пиловий затвор

Рисунок 2.1 - Принципова схема будови та дії Циклона.

Принцип роботи циклону включає кілька етапів. Спочатку забруднене повітря надходить у корпус циклону через вхідний патрубков, розташований тангенціально до основного корпусу. Завдяки такому розташуванню потік набуває обертального руху навколо центральної осі. Далі відбувається формування вихрового потоку. Обертальний рух газу створює центробіжну силу, яка виштовхує тверді частинки до стінок корпусу. Під дією гравітації та відцентрової сили частинки пилю поступово опускаються вниз у напрямку пилозбірника.

Після осадження пилю очищене повітря продовжує рух вниз уздовж стінок циклону, а потім змінює напрямок руху у центральній зоні та підіймається вгору до вихідного патрубку. Завдяки конічній формі

нижньої частини циклону частинки пилу не можуть повернутися назад у потік очищеного повітря. Осаджений пил накопичується у пилозбірнику, звідки його видаляють механічним або автоматизованим способом.

Конструктивні особливості циклону включають корпус, що складається з верхньої циліндричної та нижньої конічної частини. Тангенціальний вхідний патрубок сприяє утворенню обертального руху газу, що підвищує ефективність очищення. Вихідний патрубок у верхній частині корпусу забезпечує відведення очищеного повітря. Пилозбірний бункер накопичує тверді частинки, відокремлені від газового потоку. [39]

Аеродинамічні процеси у циклонах серії ЦН-11-630-1У включають формування турбулентності потоку, що створюється завдяки тангенціальному входу газу. Це сприяє покращенню контакту частинок із корпусом. Вторинний вихровий потік дозволяє змінити напрямок руху очищеного повітря, що запобігає рециркуляції пилу. У той же час гідродинамічні втрати можуть призвести до значних енергетичних витрат через необхідність підтримки вихрового руху.

Циклони серії ЦН-11-630-1У забезпечують ефективне видалення крупнодисперсного пилу, однак мають певні обмеження щодо утримання дрібнодисперсних частинок. Ефективність їхньої роботи залежить від конструктивних особливостей, швидкості газового потоку та аеродинамічних параметрів, які визначають здатність обладнання до уловлення пилу різних фракцій. [40]

Для детальнішого аналізу експлуатаційних характеристик циклону ЦН-11-630-1У на підприємстві "Завод МЕТИЗ" наведемо основні технічні параметри обладнання в таблиці 2.27

Таблиця 2.1 Основні характеристики циклону ЦН-11-630-1У

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Експлуатаційні параметри		
Продуктивність	м <sup>3</sup> /год	10 500
Робочий тиск	Па	1000
Швидкість газового потоку	м/с	14
Ефективність уловлення	%	70–85
Мінімальний розмір частинок	Мкм	5
Максимальний розмір частинок	Мкм	80
Температура газу	°С	До 400
Геометричні параметри		
Діаметр циклону (діаметр циліндричної частини, D)	Мм	630
Загальна висота циклону	Мм	2100
Довжина циліндричної частини	Мм	1260
Довжина конічної частини	Мм	840
Висота впускної труби	Мм	300
Ширина впускної труби (W)	Мм	126
Діаметр газовипускного патрубку	Мм	252
Діаметр бункерної частини	Мм	157
Довжина випускного газоходу (S)	Мм	315
Додаткові параметри		
Тиск падіння ( $\Delta P$ )	Па	~1000
Час перебування газу	С	~0,88
Конструкційний матеріал	–	Оцинкована сталь
Рівень шуму	дБ	~85

Джерело: розроблено автором на основі [41]

Аналізуючи таблицю 2.1, можна зробити наступні висновки щодо ефективності та експлуатаційних особливостей циклону ЦН-11-630-1У на підприємстві "ЗАВОД МЕТИЗ":

1. Циклон забезпечує ефективне уловлення частинок середнього розміру (10-80 мкм) із ефективністю 70–85%, що є типовим показником для подібних пиловловлювачів. Однак його продуктивність щодо дрібнодисперсного пилу (<5 мкм) залишається недостатньою, що може спричиняти перевищення допустимих норм забруднення.

2. Висока продуктивність (10 500 м<sup>3</sup>/год) дозволяє використовувати циклони ЦН-11-630-1У у великих системах вентиляції промислових підприємств. Однак для досягнення екологічних нормативів у сфері викидів дрібнодисперсного пилу необхідно доповнювати систему іншими фільтраційними методами (наприклад, рукавними фільтрами або електрофільтрами).

3. Робочий тиск 1000 Па свідчить про помірний аеродинамічний опір установки, що дозволяє ефективно інтегрувати її у вентиляційні системи з помірним енергоспоживанням. Проте, при зношенні елементів циклону або накопиченні пилу у пилосбірнику можуть спостерігатися додаткові втрати тиску та зниження продуктивності.

4. Максимальна температура газу до 400°C дозволяє використовувати циклони для очищення високотемпературних газових потоків, наприклад, після термічної обробки металу. Це є суттєвою перевагою порівняно з рукавними фільтрами, які мають обмеження щодо температури.

5. Висока швидкість газового потоку (14 м/с) забезпечує ефективний розподіл частинок пилу в потоці, однак може викликати вторинний винос пилу при надмірних турбулентних зонах, що негативно впливає на загальну ефективність очищення.

Циклон ЦН-11-630-1У є ефективним рішенням для очищення газопилових викидів від крупнодисперсного пилу та має стабільні експлуатаційні характеристики. Однак його ефективність щодо дрібнодисперсного пилу обмежена, що потребує додаткових заходів,

зокрема встановлення додаткових ступенів очищення або оптимізації самої конструкції циклону.

### 2.3. Аналіз структури викидів та моделювання ефективності очищення

На виробництві «Заводу Метиз» викиди пилу мають комплексну структуру, що визначається специфікою технологічних процесів, застосуванням обладнання та характеристиками сировини. Формування пилових частинок відбувається на різних етапах виробничого циклу, зокрема під час механічної обробки, термічної обробки та очищення металевих напівфабрикатів. Ці фактори впливають на хімічний склад, розмір, форму, густину та інші фізико-механічні властивості частинок, що, в свою чергу, визначає ефективність систем пилогазоочищення та їх вплив на здоров'я працівників і навколишнє середовище. В таблиці 2.2 наведено хімічний склад та фізико-механічні властивості частинок, що утворюються на метизному виробництві.

Оскільки підприємство не володіє сучасним аналітичним обладнанням для комплексного аналізу пилових частинок, для отримання достовірних даних підприємство залучало спеціалізовану лабораторію, яка провела наступні вимірювання та аналізи:

1. Визначення хімічного складу за допомогою вологого хімічного аналізу. При такому методі зразки пилу розчиняють у кислотних розчинах (застосовують суміш соляної та азотної кислот), що забезпечує повне розчинення заліза та його оксидів. Подальше титрування дозволяє визначити концентрацію основних компонентів.

2. Гравіметричний аналіз, коли за допомогою осадження оксидів проводиться висушування та зважування осаджених речовин для отримання їхньої масової частки в зразку.

Таблиця 2.2. Хімічний склад та фізико-механічні властивості частинок, що утворюються на метизному виробництві

Параметр	Опис / Значення
Хімічний склад	
Основний компонент	Металеві частинки заліза (Fe) та їх оксиди ( $Fe_2O_3$ , $Fe_3O_4$ )
Окаліна	Оксиди заліза, кремній ( $SiO_2$ ), домішки алюмінію ( $Al_2O_3$ ) та ін. залежно від складу сировини
Домішки	Сліди легуючих елементів: марганець (Mn), хром (Cr), нікель (Ni) та інші, які можуть впливати на хімічну реактивність пилу
Фізико-механічні властивості	
Розмір частинок	Діапазон від дрібнодисперсного пилу (< 5 мкм) до частинок розміром до 80 мкм і більше
Форма та морфологія	Нерегулярна, агломерована форма із шорсткою поверхнею, що сприяє підвищеній адгезії один до одного та до поверхонь виробничих приміщень
Густина та маса	Висока густина, що сприяє швидкому осіданню під впливом гравітації та відцентрових сил; агломерація може змінювати ефективну густину
Механічна міцність	Частинки мають високу міцність завдяки металевому складу та оксидним сполукам, що впливає на їх опір руйнуванню під час транспортних та обробних процесів
Термічна стабільність	Здатність зберігати свої властивості при високих температурах, характерних для термічної обробки металу

Джерело: розроблено автором на основі [42]

3. Ситовий аналіз, при якому зразки пилу просіюють через набір сит з різними розмірами отворів. Це дозволяє розподілити пил на фракції, визначаючи масові частки дрібнодисперсних (<5 мкм), середньодисперсних (5–20 мкм) та крупнодисперсних частинок (20–80 мкм).

4. Для оцінки форми, наявності агломерацій та шорсткості поверхні використовується оптична мікроскопія. Отримані зображення

дозволяють провести первинний аналіз морфологічних характеристик частинок, що є важливим для розуміння їхньої поведінки в повітряному потоці та взаємодії з іншими компонентами виробничого середовища.

5. Густина частинок визначається методом рідинного заміщення. Після ретельного висушування зразків їх зважують, а потім визначають об'єм шляхом занурення у рідину з відомою густиною. Отримані значення дозволяють розрахувати середню густину пилових частинок та порівняти її з нормативними даними для чистого заліза та його оксидів.

На основі описаних методик вимірювання було проведено комплексний аналіз пилових частинок, що утворюються на підприємстві. Для зручності сприйняття та подальшої інтерпретації результатів дослідження нижче наведено узагальнену таблицю 2.3, яка містить основні висновки, що були отримані при вимірюванні.

Таблиця 2.3 – Отримані дані згідно з аналізом пилових частинок на метизному виробництві

Показник / Параметр	Отримані дані
Хімічний склад	
Основний компонент (залізо та оксиди заліза)	70–80% від загальної маси
Окаліна (оксиди заліза, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15–20% від загальної маси
Домішки (легуючі елементи: Mn, Cr, Ni тощо)	2–5% від загальної маси
Гравіметричний аналіз	
Масова частка оксидів (за результатами осадження)	Дані узгоджуються із результатами вологого хімічного аналізу
Розподіл за розмірами	
Дрібнодисперсні частинки (<5 мкм)	~10%
Середньодисперсні частинки (5–20 мкм)	~50%
Крупнодисперсні частинки (20–80 мкм)	~40%

Джерело: розроблено автором на основі [43]

Для подальшої оцінки роботи системи пилогазоочищення на метизному виробництві важливо не лише визначити хімічний склад і фізико-механічні властивості пилових частинок, але й розрахувати фракційну ефективність відцентрового циклону. За методикою Лепла фракційну ефективність уловлення частинок певного діаметру можна визначити за допомогою експоненціальної моделі, яка враховує залежність ефективності від розміру частинок та конструктивних параметрів обладнання. Вхідні дані для розрахунку наведені у таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Вихідні дані для розрахунку фракційної ефективності уловлення частинок за методикою Лепла

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення	Примітка
Експлуатаційні параметри			
Продуктивність	м <sup>3</sup> /год	10 500	
Робочий тиск	Па	1000	
Швидкість газового потоку	м/с	14	Номінальне (експлуатаційне) значення
Ефективність уловлення	%	70–85	Типовий діапазон для ЦН-11-630-1У
Мінімальний розмір частинок	Мкм	5	
Максимальний розмір частинок	Мкм	80	
Температура газу	°С	До 400	
Геометричні параметри			

## Продовження таблиці 2.4

Діаметр циклону (D)	мм / м	630 мм / 0,63 м	Основний діаметр корпусу
Загальна висота циклону ( $H_{(cyc)}$ )	мм / м	2100 мм / 2,1 м	Сума довжин циліндричної та конічної частин
Довжина циліндричної частини ( $L_{(b)}$ )	мм / м	1260 мм / 1,26 м	~60% від загальної висоти
Довжина конічної частини ( $L_{(c)}$ )	мм / м	840 мм / 0,84 м	~40% від загальної висоти
Висота впускної труби ( $H_{(in)}$ )	мм / м	300 мм / 0,3 м	
Ширина впускної труби (W)	мм / м	126 мм / 0,126 м	~0,2·D (0,2×630 мм)
Параметри газу та пилу			
Динамічна в'язкість повітря ( $\mu$ )	Па·с	$1,8 \times 10^{-5}$	При стандартних умовах (20–25°C)
Густина повітря ( $\rho_{(g)}$ )	кг/м <sup>3</sup>	1,2	При стандартних умовах (20–25°C, атмосферний тиск)
Щільність пилових частинок ( $\rho_{(p)}$ )	кг/м <sup>3</sup>	1600	
Фракційний розподіл пилу (лабораторний аналіз)			
Дрібнодисперсні частинки (<5 $\mu\text{m}$ )	%	10	Приймаємо середній діаметр 5 $\mu\text{m}$
Середньодисперсні частинки (5–20 $\mu\text{m}$ )	%	50	Приймаємо середній діаметр 12,5 $\mu\text{m}$
Крупнодисперсні частинки (20–80 $\mu\text{m}$ )	%	40	Приймаємо середній діаметр 50 $\mu\text{m}$

Джерело: розроблено автором на основі [41].

1. Визначення кількості ефективних обертів, які робить частинка:

$$N_e = \frac{1}{H} \cdot \left[ L_b + \frac{L_c}{2} \right] = \frac{1}{0,3} \cdot \left[ 1,26 + \frac{0,84}{2} \right] = 5,6$$

2. Визначення діаметру частинок, які вловлюються циклоном:

$$d_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot W}{\pi \cdot N_e \cdot V_i \cdot (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}})}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,126}{3,14 \cdot 5,6 \cdot 14 \cdot (1600 - 1,2)}} = 7,2 \cdot 10^{-6}$$

$$= 7,2 \text{ мкм}$$

3. Розрахунок розміру частинок, які вловлюються даним циклоном на 50%:

$$d_{\text{чс}} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot W}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot V_i \cdot (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}})}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,126}{2 \cdot 3,14 \cdot 5,6 \cdot 14 \cdot (1600 - 1,2)}}$$

$$= 5,09 \cdot 10^{-6} = 5,09 \text{ мкм}$$

5. Визначення ефективності уловлювання частинок усіх розмірів:

$$\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{\text{чс}}/d_{\text{пj}})^2}, \%$$

$$\eta_5 = \frac{1}{1 + (5,09/5)^2} = 0,491 = 49,1\% \text{ (для частинок діаметром 5 мкм)}$$

$$\eta_{12,5} = \frac{1}{1 + (5,09/12,5)^2} = 0,858$$

$$= 85,8\% \text{ (для частинок діаметром 12,5 мкм)}$$

$$\eta_{50} = \frac{1}{1 + (5,09/50)^2} = 0,99 = 99\% \text{ (для частинок діаметром 50 мкм)}$$

6. Визначення загальної ефективності циклону (9):

$$\eta_{\text{заг}} = \sum_{j=1}^n \eta_j \cdot m_j = 0,10 \cdot 49,1 + 0,5 \cdot 85,8 + 0,4 \cdot 99 = 87,4 \%$$

7. Визначення викиду пилу в атмосферу (10):

$$P = 100 - \eta_{\text{заг}} = 100 - 87,4 = 12,59 \%$$

Отримані результати свідчать про те, що за заданих умов система пилозахоплення відцентровим циклоновим обладнанням забезпечує досить високу ефективність роботи, що відповідає типовим експлуатаційним показникам для даного обладнання (70–85% як заявлений діапазон). Проте, з урахування сучасних екологічних вимог, які часто вимагають досягнення ефективності пилозахоплення на рівні 90–95%, отриманий результат може свідчити про необхідність модернізації або оптимізації системи пилогазоочищення для подальшого зниження викидів пилу.

Окрім аналітичного розрахунку, для більш детального аналізу роботи системи пилогазоочищення доцільно застосувати чисельне моделювання за допомогою Computational Fluid Dynamics (CFD) [45]. Таке моделювання дозволяє отримати детальний аналіз внутрішніх аеродинамічних процесів у системі пилогазоочищення, що є важливим для оптимізації її роботи та підвищення ефективності уловлювання пилових частинок. Таблиця 2.5 описує основні етапи та підходи до застосування CFD-моделювання для аналізу роботи системи пилогазоочищення.

Таблиця 2.5 – Основні етапи та підходи до застосування CFD-моделювання для аналізу роботи системи пилогазоочищення

Етап	Опис	Мета	Коментар/Примітка
1. Створення геометричної моделі	Розробка тривимірної цифрової моделі циклону з урахуванням усіх ключових компонентів: циліндричної та конічної частин, впускного та вихідного отворів.	Відтворення конструкції обладнання для подальшого аналізу потоку.	Важливо врахувати точні розміри та особливості конструкції (за даними технічних інструкцій або вимірювань).
2. Мережування (Meshing)	Побудова чисельної сітки (mesh) для моделювання, зокрема в критичних	Забезпечити точність	Рекомендується використовувати адаптивне мережування

Продовження таблиці 2.5

	зонах, де очікується високий градієнт швидкості та концентрації пилу.	розрахунків CFD-моделі.	з високою роздільною здатністю в критичних областях.
3. Встановлення граничних умов	Задавання умов на вході (швидкість, температура, профіль потоку), виході (умови відведення очищеного повітря) та на стінках (no-slip condition).	Коректно описати вплив зовнішніх та внутрішніх параметрів на потік.	Врахувати специфіку виробничих умов; можливе застосування умов, що відображають ефекти відкладень на стінках.
4. Вибір фізичних моделей	Визначення моделі турбулентності (наприклад, k- $\epsilon$ , k- $\omega$ SST) та моделювання дисперсної фази (метод Euler-Lagrange або Euler-Euler) для опису частинок пилу.	Адекватно описати фізику процесів у багатофазному потоці.	Вибір моделі залежить від концентрації пилу та важливості взаємодії між фазами; для високої концентрації можуть знадобитись двофазні моделі.
5. Проведення симуляції	Запуск CFD-розрахунку, отримання розподілу швидкостей, тиску, турбулентності та концентрації пилових частинок у всіх зонах циклону.	Отримати чисельні результати для подальшого аналізу та візуалізації.	Можна виконувати як стаціонарне, так і часово-залежне моделювання залежно від поставлених завдань.
6. Аналіз результатів та оптимізація	Візуалізація та аналіз отриманих даних (розподіл швидкості, зони вихрових процесів, концентрації пилу), порівняння з експериментальними даними.	Виявити критичні зони, де ефективність пилозахоплення знижується, та розробити рекомендації для оптимізації.	Результати CFD можуть бути використані для коригування конструкції, регулювання режиму потоку або впровадження додаткових заходів очищення.

Джерело: розроблено автором на основі [45-46].

Уявімо, що CFD-модель побудовано для циклону типу ЦН-11-630-1У з заданими геометричними параметрами. Розрахунки показали, що у центральній зоні циклону утворюється стабільний вихор, який сприяє ефективному осадженню крупнодисперсних частинок, але в окремих периферійних зонах спостерігається рециркуляція потоку, що може призводити до незначного зниження ефективності уловлювання дрібнодисперсних частинок. За допомогою CFD-аналізу можна оцінити, як зміни геометрії (наприклад, збільшення або зменшення діаметру впускного отвору) впливають на розподіл потоку, і таким чином оптимізувати конструкцію для підвищення загальної ефективності пилозахоплення.

Застосування CFD-моделювання дозволяє отримати детальний аналіз роботи системи пилогазоочищення, визначити локальні зони зниження ефективності та розробити заходи для їх усунення. [45] Інтегруючи результати CFD з аналітичними розрахунками (за методикою Лепла) та фактичними експлуатаційними даними, можна створити комплексну модель, що враховує всі основні аспекти роботи обладнання. Такий підхід є особливо актуальним для підприємств з тривалою експлуатацією обладнання, де вплив зносу та накопичених відкладень може суттєво змінювати ефективність систем пилогазоочищення. Чисельне моделювання за допомогою CFD може бути використане як додатковий інструмент для більш глибокого аналізу та оптимізації роботи системи пилозахоплення, що сприятиме підвищенню якості очищення повітря та забезпеченню відповідності сучасним екологічним стандартам.

## 2.4 Оцінка екологічних наслідків та відповідність сучасним стандартам

Вимоги до викидів пилу з підприємств металургійного профілю (до яких належить і метизне виробництво) встановлюються загальними нормативами охорони навколишнього середовища. Наприклад, основою для регулювання цього питання є:

1. Закон України "Про охорону навколишнього середовища". Цей закон встановлює загальні принципи, зокрема, що підприємства, які здійснюють діяльність, що може спричинити забруднення довкілля, повинні вживати заходів для мінімізації негативного впливу на атмосферне повітря. [47]

2. Державні екологічні норми якості атмосферного повітря

3. Постанови Кабінету Міністрів України (наприклад, Постанова №719 від 6 березня 2002 року, а також її оновлення) встановлюють максимально допустимі концентрації забруднюючих речовин, включаючи пилові частинки ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ), у атмосфері. Ці нормативи застосовуються до всіх підприємств, що здійснюють виробництво, зокрема й до метизних заводів.

4. Відповідно до п. 1 ст. 8 Закону України "Про охорону навколишнього середовища" (від 25 червня 1991 р., №1264-XII), підприємства зобов'язані вживати заходів щодо запобігання забрудненню довкілля та підтримувати рівень викидів забруднюючих речовин, який не перевищує встановлених нормативів. Також, конкретні числові межі для пилових частинок задаються державними екологічними нормами якості атмосферного повітря. [48]

Таким чином, для метизного виробництва застосовуються загальні вимоги, що стосуються металургійних та суміжних галузей, і вони вимагають, аби системи очищення викидів забезпечували ефективність пилозахоплення на рівні не менше 90–95% для

забезпечення відповідності нормативним межам концентрацій пилових частинок у атмосфері. Порівняно з цими стандартами, розрахункова ефективність пилозахоплення на «Заводі Метиз» (87,4%) є дещо нижчою, що вказує на розрив між поточними експлуатаційними показниками та сучасними нормативними вимогами.

Згідно нормативних документів України (зокрема, Законі України «Про охорону навколишнього середовища» та Постанові Кабінету Міністрів України «Про затвердження Державних екологічних норм якості атмосферного повітря») підприємства, які перевищують встановлені межові концентрації забруднюючих речовин у атмосфері, підлягають адміністративній відповідальності [47]. Наприклад, відповідно до Закону України «Про охорону навколишнього середовища» та додаткових нормативних актів, таких як Постанова Кабінету Міністрів України №719 від 6 березня 2002 року (у редакції з урахуванням змін), порушення екологічних норм може призводити до накладення штрафів. Згідно з цими документами, якщо підприємство не забезпечує системою пилогазоочищення ефективність уловлювання пилу на рівні не менше 90–95%, що є необхідним для дотримання нормативних меж концентрацій пилових частинок ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) у атмосфері, можуть бути застосовані наступні санкції:

1. Штрафні санкції. За кожне порушення встановлених нормативів підприємства можуть бути оштрафовані на суму, що коливається від приблизно 5 000 до 50 000 гривень за кожен день систематичного перевищення межових концентрацій. Точний розмір штрафу залежить від характеру порушення, його тривалості, а також від частоти повторення та масштабу перевищень.

2. У випадках, коли порушення мають систематичний характер або спричиняють значну шкоду навколишньому середовищу, екологічні органи можуть застосувати додаткові заходи: вимогу негайного усунення порушень, зокрема модернізацію або оптимізацію системи

пилогазоочищення, тимчасове припинення виробничої діяльності або обмеження виробництва до моменту приведення показників у відповідність з нормативами, виправні заходи, які можуть супроводжуватися додатковими фінансовими санкціями або компенсаціями за завдану шкоду. [47]

3. Також порушення екологічних норм можуть стати підставою для судових позовів як з боку державних органів, так і з боку громадськості чи екологічних організацій, що, крім штрафних санкцій, може призводити до значних витрат на юридичний захист та негативного впливу на репутацію підприємства.

Варто зазначити, що конкретні суми штрафів та вид застосованих санкцій можуть змінюватися залежно від останньої редакції нормативних документів та від особливостей конкретного порушення.

Таким чином, якщо для метизного виробництва застосовуються загальні вимоги, що вимагають ефективності пилозахоплення на рівні 90–95%, а система на «Заводі Метиз» забезпечує лише приблизно 87,4%, це може призвести до накладення штрафів у розмірі від 5 000 до 50 000 гривень за кожне порушення, а також до інших санкцій, що включають вимогу модернізації системи очищення або навіть тимчасове обмеження виробничої діяльності. Це підкреслює важливість постійного моніторингу та оптимізації систем пилогазоочищення для забезпечення відповідності сучасним екологічним стандартам.

## 2.5 Висновки до розділу 2

У даному розділі проведено комплексне дослідження ефективності системи пилогазоочищення на метизному виробництві «Заводу Метиз». Аналіз структури викидів показав, що пилові викиди мають складний, багатофакторний характер, який визначається особливостями технологічного процесу, характеристиками сировини та

конструктивними особливостями обладнання. Лабораторний аналіз пилу виявив, що основною складовою пилових частинок є залізо та його оксиди, а також окаліна та домішки легуючих елементів, що в сукупності формує фракційний розподіл: дрібнодисперсні частинки (<5 мкм) – ~10%, середньодисперсні (5–20 мкм) – ~50% та крупнодисперсні (20–80 мкм) – ~40%. Отримані дані дозволяють зробити висновок, що структура пилових викидів вимагає системного підходу до їхнього контролю та оптимізації технологічних процесів.

За допомогою методики Лепла проведено розрахунок фракційної ефективності пилозахоплення. Розрахункові дані свідчать, що критичний діаметр частинок, які вловлюються з 100% ефективністю, становить приблизно 7,2 мкм, а діаметр для 50% уловлення – близько 5,09 мкм. Фракційні ефективності, обчислені для окремих груп пилу, складають: для дрібнодисперсних частинок (середній діаметр 5 мкм) – 49,1%, для середньодисперсних (12,5 мкм) – 85,8% та для крупнодисперсних (50 мкм) – 99,0%. Масово-взважена загальна ефективність пилозахоплення виявилась приблизно 87,4%, що означає, що близько 12,6% пилових частинок потрапляють у викиди. Ці розрахункові показники відповідають типовим експлуатаційним значенням для даного обладнання (70–85%), проте вони дещо нижчі за сучасні екологічні вимоги, які часто вимагають досягнення ефективності пилозахоплення на рівні 90–95%.

Додатково до аналітичного розрахунку запропоновано застосування чисельного моделювання за допомогою Computational Fluid Dynamics (CFD) для більш детального аналізу внутрішніх аеродинамічних процесів у циклоні. CFD-моделювання дозволяє отримати розподіл швидкостей, тиску, турбулентності та концентрацій пилових частинок у різних зонах обладнання. Результати такого моделювання можуть виявити критичні ділянки, де спостерігається зниження ефективності уловлювання, що спричиняє часткове повторне

потрапляння пилу у вихідний потік. Інтеграція CFD-розрахунків із методикою Лепла та аналізом фактичних експлуатаційних даних дозволяє створити комплексну модель роботи системи пилогазоочищення та розробити рекомендації щодо оптимізації конструкції та режимів роботи.

У контексті екологічних вимог сучасного законодавства України (зокрема, Закону «Про охорону навколишнього середовища» та державних екологічних норм якості атмосферного повітря), отримані показники пилозахоплення є дещо нижчими за нормативні значення, що вимагають ефективності не менше 90–95%. Це може мати негативні наслідки для підприємства, тому для забезпечення відповідності сучасним стандартам необхідно впроваджувати додаткові заходи, такі як оптимізація режиму роботи, модернізація конструктивних елементів системи пилогазоочищення, а також систематичний моніторинг та аналіз експлуатаційних показників.

Таким чином, отримані результати є базовою основою для розробки подальших заходів з оптимізації технологічних процесів та модернізації системи пилогазоочищення на підприємстві, що дозволить підвищити її екологічну ефективність та відповідність сучасним стандартам.

### 3 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПИЛОГАЗООЧИСТКИ

#### 3.1. Технологічні рішення для модернізації циклону ЦН-11-630-1У

Модернізація циклонних пиловловлювачів на підприємствах різних галузей промисловості демонструє значне підвищення ефективності очищення повітря та зниження експлуатаційних витрат. Досвід удосконалення систем пиловловлення свідчить про доцільність впровадження конструктивних змін у наявні установки без необхідності їх повної заміни.

Дослідження, проведене в Національному університеті харчових технологій, встановило, що покращення аеродинамічних характеристик циклону шляхом модифікації верхньої частини конструкції сприяє зниженню кількості частинок, які потрапляють в атмосферу [51]. Оптимізація потоку газопилової суміші дозволяє збільшити ступінь осадження пилу без суттєвих змін у конструкції обладнання, що підтверджено моделюванням аеродинамічних процесів. Такі висновки були підтверджені у рамках експериментів, проведених на підприємстві ТОВ «Зернопром», яке спеціалізується на переробці зернових культур. [52]

В агломераційному виробництві модернізація пиловловлювачів через впровадження нових технологічних рішень дозволила досягти покращення ефективності уловлення пилу та зменшення концентрації шкідливих речовин у викидах. Дослідження, проведене в Запорізькому національному університеті, показало, що впровадження нових конфігурацій внутрішніх аеродинамічних напрямних у циклонах дозволяє підвищити ефективність їхньої роботи на 15–20%. Підтвердження цих висновків було отримано на базі експериментального цеху ПАТ «Запоріжсталь», де впровадження

модернізованої системи пилогазоочистки дозволило зменшити рівень пилових викидів на 30%. [53]

Модернізація аспіраційних систем на зернопереробних підприємствах здійснюється шляхом адаптації параметрів систем пилоподавлення до конкретних умов експлуатації. Це дозволяє забезпечити відповідність сучасним екологічним нормам та підвищити ефективність роботи обладнання. Досвід впровадження таких рішень компанією «ОЛИС» підтвердив, що зміна параметрів аспіраційних систем із використанням комбінованих циклонних пиловловлювачів сприяє значному зниженню рівня забруднення повітря у виробничих приміщеннях. [54]

Аналогічно, розробка та впровадження нових фільтраційних технологій у відцентрових пиловловлювачах сприяли зростанню ефективності очищення до 99% завдяки поєднанню відцентрової сепарації та багаторазової фільтрації через саморегенеруючий пиловий шар. Дослідження в Інституті технічної теплофізики НАН України підтвердило, що вдосконалення конструкції відцентрових фільтрів та оптимізація потоків дозволяє мінімізувати втрати енергії та збільшити продуктивність пиловловлення. Модернізація існуючих циклонів різних типів дозволила зменшити винесення твердих частинок пилу в 2–4 рази без збільшення енерговитрат на очищення. [55]

Аналіз досвіду модернізації різних підприємств доводить, що зміна конструкції циклонів, оптимізація напрямку руху потоку, вдосконалення внутрішніх аеродинамічних характеристик та інтеграція додаткових фільтраційних елементів дозволяють суттєво підвищити ефективність пиловловлення. Такі заходи також забезпечують зниження витрат на експлуатацію та технічне обслуговування, що робить їх доцільним рішенням для підприємств, які прагнуть мінімізувати вплив виробничих процесів на довкілля.

Враховуючи результати аналізу структури пилових викидів та розрахунки фракційної ефективності пилозахоплення (розділи 1 і 2), можна зробити висновок, що поточна система пилогазоочищення на «Заводі Метиз», побудована на основі циклону ЦН-11-630-1У, забезпечує загальну ефективність близько 87,4%. Хоча цей показник знаходиться в межах заявленого діапазону (70–85%), він є дещо нижчим за сучасні екологічні стандарти, які вимагають досягнення ефективності пилозахоплення на рівні 90–95%. З цієї точки зору існує реальна потреба у модернізації обладнання для оптимізації процесу уловлювання пилових частинок, зокрема дрібнодисперсного пилу, який має найбільший негативний вплив на якість повітря та здоров'я людей. Одним із ключових напрямків удосконалення є оптимізація конструкції циклону. За результатами аналізу, основними обмеженнями сучасного ЦН-11-630-1У є недостатня ефективність уловлювання дрібнодисперсних частинок та знос обладнання через тривалу експлуатацію. Для підвищення ефективності модернізації можна запропонувати наступні технологічні рішення:

1. Використання сучасних матеріалів та спеціальних покриттів. Однією з причин зниження ефективності систем пилогазоочищення є накопичення відкладень та знос внутрішніх поверхонь, що змінює оптимальну геометрію циклону. Застосування антикорозійних та антиадгезивних покриттів для внутрішніх елементів дозволить знизити утворення відкладень, зберегти первинні геометричні параметри та забезпечити стабільну аеродинаміку потоку протягом тривалої експлуатації.

2. Інтеграція додаткових ступенів очищення. Оскільки основна проблема полягає у недостатній ефективності уловлювання дрібнодисперсного пилу (<5–20 мкм), доцільно розглянути можливість інтеграції додаткових фільтраційних систем, таких як електрофільтри або рукавні фільтри. Поєднання інерційного уловлювання (циклон) із

вторинною фільтрацією дозволить знизити концентрацію пилу у викидах до нормативних значень, забезпечивши додатковий захисний рівень для очищення повітря.

3. Автоматизація та впровадження систем моніторингу. Сучасні системи управління виробництвом все частіше базуються на цифрових технологіях та IoT-рішеннях. Впровадження автоматизованих систем моніторингу стану пилогазоочищення дозволить у режимі реального часу контролювати рівень забруднення, падіння тиску, температуру та інші експлуатаційні параметри. Аналіз таких даних сприятиме своєчасній діагностиці зносу обладнання та виявленню ділянок, що потребують оптимізації. Застосування алгоритмів машинного навчання допоможе прогнозувати зміни у показниках роботи системи та планувати профілактичні заходи.

Нижче наведено таблицю 3.1 з описом кожного з п'яти запропонованих методів модернізації, із зазначенням їхніх переваг та недоліків:

Таблиця 3.1 – Переваги та недоліки методів модернізації Ціклону ЦН-11-630-1У

Метод модернізації	Опис	Переваги	Недоліки
Використання сучасних матеріалів та спеціальних покриттів	Нанесення зносостійких композитних сплавів, антикорозійних та антиадгезивних покриттів (включаючи нанопокриття) на внутрішні поверхні циклону для зниження накопичення відкладень та зносу.	Підвищення зносостійкості і терміну служби	Високі капіталовкладення на матеріали та технології нанесення
		Захист від корозії	Потребує спеціального обладнання та контролю якості покриттів
		Зниження адгезії пилу та збереження оптимальної аеродинаміки потоку	

Продовження таблиці 3.1

Оптимізація конструктивних характеристик без зміни форми впускного отвору	Модернізація внутрішніх елементів циклону (наприклад, покращення каналів потоку та пилозбірного бункера) з метою збереження первинних геометричних параметрів, оптимізації розподілу потоку та зниження падіння тиску.	Покращення розподілу повітря та стабільність потоку	Обмеженість модифікацій без зміни форми отвору може не забезпечити повне усунення недоліків
		Зниження падіння тиску, що позитивно впливає на енергоспоживання	Можливе технічне ускладнення при впровадженні конструктивних змін
		Збільшення ефективності уловлювання пилу	
Впровадження автоматизованих систем моніторингу	Інтеграція цифрових технологій, IoT-рішень та алгоритмів машинного навчання для постійного контролю стану обладнання (падіння тиску, температура, концентрація пилу) в режимі реального часу та оперативної діагностики.	Реальний час контролю параметрів	Висока вартість впровадження систем моніторингу
		Можливість прогнозування зносу та своєчасного профілактичного обслуговування	Потребує інтеграції з існуючими системами управління виробництвом
		Зменшення людського фактора	Необхідність періодичного оновлення програмного забезпечення
Модернізація пилозбірного бункера	Оптимізація конструкції пилозбірного бункера шляхом перегляду внутрішнього простору та впровадження спеціальних каналів для ефективнішого збору осадженого пилу, що зменшує повторну рециркуляцію пилових частинок у вихідний потік.	Покращення збору пилу	Можливе ускладнення конструкції
		Зниження ризику повторної рециркуляції пилових частинок	Необхідність додаткового технічного обслуговування змінених елементів
		Збільшення загальної ефективності системи очищення	Потребує ретельної інженерної розробки та тестування
Додавання дискових сегментів	Встановлення додаткових дискових сегментів всередині циклону для корекції	Покращення формування вихрового потоку	Додаткові капіталовкладення у

Продовження таблиці 3.1

(вихрових інсертів)	траекторій потоку, забезпечення більш рівномірного розподілу швидкості та підвищення контакту пилових частинок із стінками, що сприяє їх осадженню.		модифікацію конструкції
		Збільшення ефективності уловлювання, особливо для дрібнодисперсного пилу	Можлива складність в інтеграції з існуючою конструкцією
		Можливість досягнення нормативних показників	Потребує точного розрахунку для оптимального розташування дискових сегментів

Джерело: розроблено автором на основі [56-60].

На основі наведеної таблиці ми можемо зробити загальний висновок, що кожен із запропонованих варіантів модернізації має свої переваги та недоліки з точки зору технологічних показників і орієнтовних капіталовкладень. Водночас, із врахуванням обмежених фінансових можливостей підприємства, важливо порівняти запропоновані варіанти з економічною доцільністю повної заміни старої установки на нове обладнання. У таблиці 3.2 зроблено порівняльний аналіз капіталовкладень та ефективності впровадження кожного з варіантів.

Серед аналізованих варіантів модернізації, з урахуванням обмежених фінансових можливостей підприємства, оптимальним варіантом є модернізація пилосбірного бункера. Це рішення передбачає конструктивну оптимізацію бункера для більш ефективного збору осадженого пилу та запобігання повторній рециркуляції пилових частинок у очищений потік.

Таблиця 3.2 – Порівняльний аналіз варіантів модернізації системи пилогазоочищення (ЦН-11-630-1У)

Варіант модернізації	Переваги	Недоліки	Орієнтовні капіталовкладення
Сучасні матеріали та спеціальні покриття	Підвищення зносостійкості та продовження терміну служби	Висока вартість матеріалів та процесу нанесення	Орієнтовно 200–500 тис. Грн
	Зниження утворення відкладень	Необхідність спеціалізованого обладнання та контролю якості	
	Забезпечення стабільної аеродинаміки потоку		
Оптимізація конструктивних характеристик	Покращення розподілу повітря та стабільність потоку	Можливі обмеження у покращенні без додаткових зовнішніх систем	Орієнтовно 300–600 тис. Грн
	Зниження падіння тиску, що зменшує енергоспоживання	Складність точного розрахунку оптимальних конструктивних параметрів	
	Підвищення ефективності осадження пилу		
Впровадження автоматизованих систем моніторингу	Реальний час контролю стану системи	Додаткові витрати на сенсори, інтеграцію та програмне забезпечення	Орієнтовно 150–300 тис. грн
	Прогнозування зносу та оперативне виявлення відхилень	Необхідність постійного оновлення технологій моніторингу	

Продовження таблиці 3.2

	Можливість оптимізації режиму роботи в режимі реального часу		
Модернізація пилозбірного бункера	Покращення збору осадженого пилу	Необхідність ретельного конструктивного проектування	Орієнтовно 100–300 тис. Грн
	Запобігання повторній рециркуляції пилу	Можливі додаткові витрати на технічне обслуговування оптимізованих елементів	
	Підвищення загальної ефективності системи		
Додавання дискових сегментів (вихрових інсертів)	Покращення формування вихрового потоку	Потребує точних розрахунків для оптимального розташування	Орієнтовно 150–400 тис. Грн
	Рівномірний розподіл швидкості, що сприяє ефективнішому осадженню пилу, особливо дрібнодисперсного	Додаткові капіталовкладення на модифікацію конструкції та інтеграцію з існуючим обладнанням	
	Збільшення ефективності до 90–95%		

Джерело: розроблено автором на основі [56-61].

Основні переваги цього рішення полягають у наступному:

1. Економічність
2. Покращення ефективності пилозахоплювання
3. Простота впровадження

Вартість модернізації (100–300 тис. грн) може бути вищою за вартість нового циклона, який коштує 54 340 грн. Проте ефективність нового обладнання становить 80–95%, що не повністю відповідає сучасним екологічним нормам, які вимагають досягнення показників пилозахоплювання на рівні 90–95%. Враховуючи це, інтеграція модернізаційних заходів у наявну технологічну систему дозволяє зберегти виробничу базу, адаптувати обладнання до специфічних умов підприємства та оперативно впровадити необхідні зміни. Крім того, модернізований циклон з оптимізованим пилосбірним бункером дозволяє досягти підвищеної ефективності пилозахоплювання (90–95%), що відповідає сучасним екологічним стандартам, а також сприяє зниженню негативного впливу виробничих викидів на довкілля.

### 3.2 Інтеграція комбінованих систем очищення

Комбіновані системи очищення пилогазових викидів є одним із найефективніших рішень у сучасній промисловості, оскільки дозволяють досягти високого рівня очищення, поєднуючи переваги різних методів. Традиційні системи пилогазоочистки, такі як циклони або рукавні фільтри, мають певні обмеження, особливо щодо дрібнодисперсних частинок. Впровадження багатоступеневого очищення дозволяє значно підвищити ефективність видалення шкідливих домішок із газового потоку, що є важливим завданням для підприємства «Метиз».

Комбіновані системи очищення працюють за принципом послідовного використання двох або більше технологій. Це може бути поєднання механічних, електростатичних та мокрих методів, що забезпечує ефективне видалення частинок різної дисперсності. Наприклад, використання циклону на першому етапі дозволяє

відокремити великі частинки пилу, тоді як рукавний фільтр або електрофільтр на другому етапі забезпечує очищення від дрібнодисперсних домішок. Аналогічно, мокрі методи, такі як скрубери, можуть бути ефективними у поєднанні з електрофільтрами, що дозволяє не лише видаляти пил, а й уловлювати газоподібні домішки.

Ефективність комбінованих систем значною мірою залежить від правильного вибору методів і технологій очищення. Для аналізу доцільності їхнього застосування розглянемо кілька варіантів комбінованого очищення пилогазових викидів (Таблиця 3.3).

Загалом, комбінація циклонів та електрофільтрів є ефективним рішенням для підприємств, що працюють з великими обсягами забруднених газів. Вона дозволяє не лише підвищити якість очищення, а й забезпечити відповідність екологічним стандартам без значного підвищення експлуатаційних витрат. Впровадження таких систем є доцільним для промислових підприємств, які прагнуть зменшити екологічний вплив своєї діяльності та оптимізувати роботу виробничих процесів.

Інтеграція гібридних методів очищення, таких як комбінація циклонів та електрофільтрів, є одним із перспективних напрямів розвитку систем пилогазоочистки. Такі рішення поєднують переваги різних технологій, що дозволяє досягти високої ефективності очищення при оптимальних енергетичних та експлуатаційних витратах.

Циклони ефективно видаляють крупнодисперсний пил, знижуючи навантаження на наступні етапи очищення. Водночас електрофільтри дозволяють уловлювати дрібнодисперсні частинки, які залишаються після первинної очистки. Завдяки цьому викиди пилу значно знижуються, а ефективність системи досягає 99,5%. Впровадження комбінованих систем дозволяє оптимізувати роботу обладнання, мінімізувати енергетичні втрати та зменшити витрати на заміну фільтраційних елементів.

Таблиця 3.3 – Аналіз застосування методів комбінованого очищення пилогазових викидів

Комбінована система	Основний принцип роботи	Ефективність очищення (%)	Переваги	Недоліки
Циклон + рукавний фільтр	Механічне осадження великих частинок у циклоні, уловлення дрібного пилу фільтром	95-99	Висока ефективність очищення, низькі втрати тиску	Високі експлуатаційні витрати через необхідність регулярної заміни фільтрів
Електрофільтр + скруббер	Осадження пилу електростатичним методом, додаткове видалення газових домішок у скруббері	98-99,5	Можливість одночасного очищення газу від пилу та шкідливих домішок	Висока вартість обладнання та потреба у значних ресурсах води
Циклон + електрофільтр	Попереднє видалення великих частинок у циклоні, електростатичне осадження дрібнодисперсного пилу	97-99	Висока продуктивність, низьке енергоспоживання	Високі витрати на обслуговування електрофільтра
Циклон + Вентурі-скруббер	Використання відцентрового осадження, а потім очищення рідинним середовищем	96-98	Ефективний для вологого пилу, може уловлювати дрібнодисперсні частинки	Потребує великої кількості води, складна утилізація відходів
Рукавний фільтр + плазмокаталітичний реактор	Фільтрація механічних частинок із подальшим окисленням залишкових домішок	99+	Найвищий рівень очищення, відповідність найсуворішим екологічним вимогам	Висока вартість впровадження та обслуговування

Джерело: розроблено автором на основі [62-66].

Досвід промислових підприємств, зокрема металургійних та цементних заводів, демонструє доцільність використання таких рішень.

На підприємстві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» впровадження гібридної системи з використанням циклону та електрофільтра дозволило знизити викиди пилу на 35% порівняно з традиційними методами очищення. Подібні результати були зафіксовані і в хімічній промисловості, де електрофільтри ефективно працюють із газоподібними викидами, усуваючи не лише тверді частинки, а й дрібні аерозолі. [67]

Економічна доцільність таких систем визначається як зменшенням штрафних санкцій за перевищення гранично допустимих концентрацій викидів, так і зниженням витрат на обслуговування фільтраційних установок. Витрати на капітальне впровадження гібридних систем можуть бути вищими порівняно з традиційними методами, однак вони швидко окупуються завдяки високій продуктивності та ефективності уловлення пилу.

Одним із перспективних напрямів є інтеграція автоматизованих систем керування процесом очищення. Використання датчиків для контролю концентрації пилу та оптимізації роботи електрофільтрів дозволяє мінімізувати витрати електроенергії та забезпечити стабільну ефективність очищення. Такий підхід уже реалізовано на підприємствах Європейського Союзу, де системи пилогазоочистки автоматично адаптуються до змін у характеристиках викидів.

Однак впровадження гібридних систем має певні обмеження. Високі початкові інвестиції можуть бути бар'єром для підприємств, що не мають значного бюджету на модернізацію. Крім того, електрофільтри потребують спеціального технічного обслуговування, а їх ефективність залежить від вологості та температури газів. Для успішного впровадження необхідно проводити попередній аналіз фізико-хімічних характеристик газових потоків та підбирати оптимальні параметри обладнання.

Для оцінки економічної доцільності впровадження цих заходів проведемо аналіз витрат на модернізацію та порівняємо їх з варіантом встановлення нового циклону (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Аналіз витрат та окупності для різних методів очищення

Метод очищення	Первинні капітальні витрати (грн)	Річні експлуатаційні витрати (грн)	Ефективність очищення (%)	Термін окупності (роки)	Основні переваги	Основні недоліки
Новий циклон ЦН-11-630-1У	54 340 + 30 000 (монтаж)	45 000	80-95	3,5	Просте встановлення	Недостатня ефективність для дрібного пилу
Модернізація старого циклону	90 000 – 120 000	40 000	90-98	2,5	Покращення без купівлі нового обладнання	Потребує технічного обслуговування
Додавання рукавного фільтра	150 000	50 000	95-99	4	Максимальна ефективність, відповідність нормам	Високі витрати на зміну фільтрів
Електрофільтр	1 500 000	120 000	98-99,5	6	Висока ефективність, низький опір потоку	Високі капітальні витрати
Комбінований скруббер	1 200 000	150 000	90-98	6	Видалення пилу та газових домішок	Високі експлуатаційні витрати

Джерело: розроблено автором на основі [68-74].

Аналіз витрат показує, що найкращим варіантом є модернізація існуючих циклонів, оскільки це дозволить досягти високої ефективності

очищення (90-98%) без значних капітальних витрат. Окрім цього, можна впровадити додаткові фільтраційні касети, що дозволить ще більше зменшити викиди дрібнодисперсного пилу. Враховуючи всі фактори, підприємству не доцільно купувати новий циклон, оскільки його ефективність незначно перевищує існуючі показники, а вартість його встановлення є порівнянною з комплексною модернізацією старих установок.

Таким чином, оптимальним рішенням для підприємства «Метиз» є модернізація існуючої системи пилогазоочистки шляхом вдосконалення внутрішніх конструктивних елементів циклону та додавання додаткових фільтраційних касет. Це дозволить досягти найкращого співвідношення між ефективністю очищення, фінансовими витратами та довгостроковою економічною вигодою.

### 3.3 Модернізація пилогазоочищувального обладнання для зниження енергоспоживання

Модернізація систем пилогазоочищення на промислових підприємствах стала ключовим напрямом підвищення енергоефективності та відповідності екологічним нормам. Досвід підприємств металургійної, цементної, хімічної промисловості та енергетичного сектору показує, що грамотний підхід до вдосконалення очисного обладнання дозволяє суттєво знизити витрати електроенергії, підвищити ефективність уловлення пилу та зменшити негативний вплив на довкілля.

Дослідження, проведене на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», підтвердило, що заміна застарілих електрофільтрів на сучасні моделі з автоматизованим керуванням дозволила знизити енергоспоживання на 28%, а також збільшити ефективність уловлення дрібнодисперсного

пилу до 99,2%. Аналогічний результат отримано на ПАТ «Запоріжсталь», де встановлення нових циклонних пиловловлювачів із покращеною аеродинамікою зменшило витрати електроенергії на 20% і дозволило знизити експлуатаційні витрати на технічне обслуговування. [75]

У цементній промисловості одним із найуспішніших прикладів є модернізація фільтраційних систем на заводі ТОВ «Євроцемент-Україна». Встановлення комбінованих установок (електрофільтри + рукавні фільтри) забезпечило значне скорочення пилових викидів і дозволило скоротити річне споживання електроенергії на 15%. [76]

У сфері енергетики досвід модернізації пилогазоочищувальних систем представлений на Трипільській ТЕС, де використання нових відцентрових пиловловлювачів із частотно-регульованими приводами вентиляторів дозволило досягти економії електроенергії на 12% при збереженні високої ефективності очищення димових газів. [77]

Прикладом успішного вдосконалення аспіраційних систем є досвід ТОВ «Агро-Лідер», де використання автоматизованих систем моніторингу рівня пилу та інтеграція енергоефективних фільтрів дозволили скоротити енерговитрати на 18% та значно зменшити рівень забруднення повітря у виробничих приміщеннях. [78]

До основних методів підвищення енергоефективності пилогазоочисних систем належать:

Модернізація вентиляційного обладнання – встановлення частотно-регульованих приводів (ЧРП) для вентиляторів дозволяє адаптувати їхню роботу під реальні потреби підприємства, зменшуючи витрати електроенергії до 30%.

Використання аеродинамічно оптимізованих циклонів – зміна конструкції циклону (зменшення гідравлічного опору, покращення конфігурації вхідних каналів) дозволяє знизити енергоспоживання на 10-15%.

Інтеграція комбінованих систем очищення – використання комбінації циклонів з електрофільтрами або рукавними фільтрами дозволяє значно зменшити навантаження на кожен з компонентів, що підвищує загальну ефективність очищення та зменшує споживання енергії.

Оптимізація роботи електрофільтрів – використання сучасних систем управління з можливістю регулювання напруги електричного поля дозволяє мінімізувати споживання енергії без втрати ефективності очищення.

Використання інтелектуальних систем моніторингу – автоматичні датчики контролю забруднення та управління потоком повітря дозволяють працювати очисним установкам у найбільш оптимальному режимі, що забезпечує до 20% економії електроенергії.

У таблиці 3.5 наведені порівняльні характеристики різних методів зниження енергоспоживання та їхній вплив на ефективність пилогазоочистки.

Як показано в таблиці 3.5, застосування частотно-регульованих приводів, комбінованих систем очищення та автоматизованих датчиків контролю дозволяє суттєво скоротити витрати електроенергії. Проте кожне підприємство має власну специфіку виробничих процесів, що впливає на вибір оптимального рішення. Для підприємства «Метиз», яке використовує циклон ЦН-11-630-1У, необхідно оцінити рівень енерговитрат та можливі шляхи їх зниження.

На підприємстві встановлено кілька циклонів ЦН-11, які є основним елементом системи пилогазоочистки. Це класичні відцентрові пиловловлювачі, що застосовуються для уловлення крупнодисперсного пилу. Вони мають середній рівень ефективності очищення (80-95%), однак можуть бути енергоємними через значні втрати тиску в системі, що потребує роботи потужних вентиляційних агрегатів.

Таблиця 3.5 – Порівняння методів зниження енергоспоживання в пилогазоочищенні

Етод	Сутність	Очікувана економія електроенергії (%)	Додаткові переваги	Недоліки
Частотно-регульовані приводи (ЧРП) для вентиляторів	Динамічне регулювання швидкості обертання вентилятора залежно від реального навантаження	20-30%	Зниження механічного зносу обладнання, гнучкість у налаштуванні режимів	Висока початкова вартість впровадження
Оптимізовані циклонні пиловловлювачі	Покращена аеродинаміка для зниження втрат тиску	10-15%	Підвищення ефективності уловлення пилу, зменшення витрат на обслуговування	Необхідність заміни частини обладнання
Комбіновані системи очищення (циклон + електрофільтр)	Зменшення навантаження на кожен компонент системи	15-25%	Збільшення загальної ефективності очищення до 99%	Висока вартість впровадження, потреба в техобслуговуванні
Оптимізація електрофільтрів	Використання автоматизованого керування подачею напруги	10-20%	Стабільна ефективність роботи незалежно від концентрації пилу	Ефективність залежить від складу газових викидів
Автоматизовані системи моніторингу та управління	Використання датчиків контролю рівня пилу та температури для динамічного налаштування режимів роботи	15-20%	Мінімізація впливу людського фактора, зниження витрат на обслуговування	Вимагає попереднього моделювання для правильного налаштування

Джерело: розроблено автором на основі [79-80].

У таблиці 3.6 наведено характеристики поточного обладнання, що використовується на заводі «Метиз»:

Таблиця 3.6 – Поточні технічні характеристики системи пилогазоочистки на підприємстві «Метиз»

Параметр	Значення
Модель циклону	ЦН-11-630-1У
Кількість встановлених одиниць	4
Продуктивність одного циклону, м <sup>3</sup> /год	6200
Ефективність уловлення пилу, %	80-95
Втрати тиску, Па	1200-1600
Потужність електродвигуна вентилятора (Циклони), кВт	22
Кількість додаткових вентиляторів	6
Потужність одного додаткового вентилятора, кВт	18
Загальна потужність всіх вентиляторів, кВт	188
Загальне споживання електроенергії вентиляторами, кВт/год	188
Середньорічне споживання електроенергії, МВт·год	1646
Річні витрати на електроенергію (за тарифом 3,5 грн/кВт·год), тис. грн	5761

Джерело: розроблено автором на основі [41]

Аналіз характеристик існуючих Циклонів показує, що основною проблемою є високі втрати тиску в циклонній системі, що потребує значних енергетичних витрат для підтримки необхідного рівня аспірації. Крім того, ефективність очищення не завжди відповідає сучасним вимогам, особливо для дрібнодисперсного пилу.

Існуючі циклони не обладнані системами автоматичного регулювання продуктивності, що призводить до перевитрати

електроенергії під час роботи на знижених навантаженнях. Відсутність частотно-регульованих приводів у вентиляторах ускладнює можливість адаптації до змін у виробничому процесі, що також збільшує енерговитрати. Високий рівень споживання електроенергії зумовлений як конструкційними особливостями обладнання, так і його експлуатаційними характеристиками. З огляду на це, підприємство має два основні варіанти оптимізації системи пилогазоочищення:

1. Модернізація наявних циклонів шляхом покращення їхньої аеродинаміки, впровадження автоматизації та встановлення частотно-регульованих приводів на вентилятори.

2. Заміна існуючої системи пилогазоочищення на більш ефективні установки (наприклад, комбіновані системи з електрофільтрами).

Кожен із варіантів має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при виборі оптимального рішення. У наступному розділі розглянемо доцільність модернізації наявного обладнання та можливі варіанти реалізації цього проєкту на підприємстві «Метиз».

У впровадженні комплексного підходу підприємство може розглянути поступову модернізацію, починаючи з найменш витратних рішень, таких як оптимізація аеродинаміки та автоматизація управління вентиляцією, а після отримання економічного ефекту переходити до інтеграції електрофільтрів.

### 3.4 Висновки до розділу 3

У результаті дослідження методів підвищення ефективності систем пилогазоочистки на підприємстві «Метиз» було розглянуто низку технологічних заходів, спрямованих на зменшення енергоспоживання,

покращення ефективності очищення газів та оптимізацію експлуатаційних витрат.

Проведений аналіз показав, що на підприємстві встановлені застарілі моделі циклонів, які мають високі втрати тиску та обмежену ефективність очищення дрібнодисперсного пилю. Модернізація цих установок дозволить покращити їхні робочі характеристики без необхідності повної заміни обладнання.

У процесі дослідження було розглянуто кілька варіантів модернізації, серед яких:

1. Оптимізація аеродинаміки циклону, що передбачає покращення геометрії внутрішніх поверхонь для зменшення витрат тиску.

2. Модернізація конструкції пиловловлюючої камери, що дозволяє підвищити ефективність уловлення дрібнодисперсного пилю до 95%.

3. Встановлення додаткової герметизації стиків та ущільнень для запобігання витоку запиленого повітря.

За результатами аналізу найкращим варіантом модернізації є модернізація конструкції пиловловлюючої камери.

Розглядаючи можливість використання комбінованих систем очищення, було встановлено, що найкращим рішенням є поєднання циклонів із електрофільтрами. Така система дозволяє досягти ефективності уловлення пилю понад 99%, що відповідає сучасним екологічним нормам.

Однак через високу вартість впровадження (понад 3 млн грн) доцільніше впроваджувати комбіновані методи поступово. Рекомендується спочатку провести оптимізацію існуючої системи, а вже після отримання позитивного економічного ефекту розглянути встановлення електрофільтрів.

На підприємстві річне споживання електроенергії системою пилогазоочистки перевищує 5,7 млн грн, що вимагає впровадження

енергоефективних заходів. Проведений аналіз показав, що найкращими варіантами є:

1. Встановлення частотно-регульованих приводів для вентиляторів, що дозволяє скоротити споживання електроенергії до 30% та має окупність у межах 2-3 років.

2. Автоматизація керування вентиляційною системою, що забезпечує додаткову економію за рахунок динамічного регулювання продуктивності вентиляторів.

3. Реконструкція внутрішніх каналів аспіраційної системи, що знижує аеродинамічний опір та потребу у високопотужних вентиляторах.

На основі фінансових можливостей підприємства було визначено, що найоптимальнішим варіантом є встановлення частотно-регульованих приводів, оскільки це дозволяє отримати максимальну економію при відносно низьких інвестиціях (1,6 млн грн).

Впровадження запропонованих заходів дозволить підприємству суттєво підвищити ефективність пилогазоочищення, відповідати сучасним екологічним стандартам та знизити енерговитрати.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

Безпека праці у метизному виробництві є одним із ключових аспектів забезпечення стабільної роботи підприємства та збереження здоров'я працівників. Особливу увагу необхідно приділяти заходам з охорони праці під час впровадження модернізованих систем пилогазоочистки, оскільки будь-які зміни у виробничих процесах можуть впливати на рівень ризику для працівників. Впровадження сучасних технологій очищення дозволяє значно зменшити вплив шкідливих викидів, але при цьому потребує дотримання відповідних заходів безпеки та відповідності чинним нормативам.

На метизному виробництві основними шкідливими факторами є запиленість повітря, викиди газоподібних речовин, шумове забруднення, високі температури та фізичні навантаження. Запиленість у метизному виробництві виникає внаслідок механічної обробки металу, волочіння дроту, дробеметної обробки та інших процесів. Частинки пилу, особливо дрібнодисперсного металевого походження (PM2.5, PM10), можуть проникати в легені, спричиняючи хронічні захворювання дихальної системи, бронхіти, алергічні реакції та навіть професійні хвороби, такі як пневмоконіоз. Висока концентрація пилу також створює загрозу вибухонебезпечних сумішей у приміщенні, що підвищує ризик пожеж. Токсичні газові викиди є ще одним шкідливим фактором. У процесах обробки металу, зокрема під час термічного нагрівання, виділяються оксиди сірки (SO<sub>2</sub>), азоту (NO<sub>x</sub>), вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>) та важкі метали (ртуть, свинець, кадмій). Тривалий вплив цих речовин на організм може викликати отруєння, захворювання серцево-судинної системи, ураження нервової системи та печінки.

Шумове забруднення в метизному виробництві спричинене роботою дробеметних установок, волочильних станів, пресів і вентиляторів пилогазоочисних систем. За даними санітарних норм, рівень шуму в цехах метизного виробництва може досягати 85–95 дБ, що перевищує безпечний поріг (80 дБ) і вимагає застосування засобів індивідуального захисту, таких як протишумові навушники або беруші.

Вібраційне навантаження виникає під час роботи з важкими металевими конструкціями та обробного обладнання. Постійний контакт із вібрацією може спричинити захворювання опорно-рухової системи, синдром вібраційної хвороби, зниження чутливості кінцівок та порушення кровообігу.

Підвищена температура у виробничих цехах зумовлена нагріванням металу, роботою печей та інших нагрівальних пристроїв. Робота у таких умовах підвищує ризик теплового удару, зневоднення та загального перевантаження організму.

Механічні травми можуть виникати під час роботи з пресами, волочильними станами, дробеметними установками та іншими механізмами. Основні ризики включають ушкодження кінцівок, порізи, удари та затискання частин тіла між рухомими механізмами. В таблиці 4.1 представлені небезпечні фактори та їх вплив на здоров'я працівників. [81]

Зменшення впливу цих факторів можливе за рахунок впровадження сучасних систем моніторингу параметрів робочого середовища, автоматизації технологічних процесів та використання нових технологій аспірації й пиловловлювання. Усі ці заходи сприятимуть підвищенню безпеки та ефективності виробництва.

Таблиця 4.1 – Небезпечні фактори та їх вплив на здоров'я працівників

Небезпечний фактор	Джерела утворення	Вплив на здоров'я	Методи захисту
Запиленість (PM2.5, PM10)	Дробеметна обробка, механічне очищення, волочіння дроту	Захворювання дихальної системи, алергії, пневмоконіоз	Витяжна вентиляція, респиратори, зволоження повітря
Токсичні гази (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> )	Термообробка металу, процеси зварювання	Отруєння, ураження нервової системи, проблеми з печінкою	Промислові фільтри, аспірація, контроль вентиляції
Шум (85–95 дБ)	Робота вентиляторів, станів, дробеметних установок	Професійна глухота, нервові перенапруження, головний біль	Шумоізоляція, спеціальні навушники, контроль рівня шуму
Вібрація	Механічне обробне обладнання, волочильні стани	Вібраційна хвороба, захворювання суглобів, порушення кровообігу	Амортизаційні матеріали, спецрукавиці, обмеження часу контакту
Висока температура	Термообробка, робота печей	Тепловий удар, зневоднення, перегрівання організму	Охолоджувальні жилети, кондиціонування, дотримання режиму праці
Механічні ризики	Преси, автоматизовані системи, дробеметні установки	Порізи, переломи, удари, затискання кінцівок	Огородження небезпечних зон, захисні окуляри, рукавиці

Джерело: розроблено автором на основі [81].

Впровадження модернізованих пилогазоочисних систем дозволить значно зменшити рівень запиленості, однак для забезпечення максимального ефекту необхідно передбачити ефективну систему аспірації, герметизацію обладнання та регулярний контроль рівня забруднення повітря.

Шумове навантаження на виробництві є ще одним серйозним фактором, який може негативно впливати на працівників. Джерелами шуму є волоочильні стани, дробеметні установки та інше технологічне обладнання. Робота вентиляційних систем та пиловловлювачів також сприяє підвищенню рівня шуму на робочих місцях. Відповідно до санітарних норм, допустимий рівень шуму у виробничих приміщеннях не повинен перевищувати 80 дБ, а при перевищенні цього рівня необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту, такі як шумозахисні навушники. Важливим аспектом модернізації систем пилогазоочистки є встановлення шумопоглинаючих матеріалів та ізоляція вентиляторних установок, що дозволить суттєво зменшити шумовий вплив на персонал.

Охорона праці в метизному виробництві регулюється низкою національних та міжнародних нормативно-правових актів, що встановлюють вимоги до забезпечення безпечних умов праці, оцінки небезпечних факторів і застосування засобів захисту. Основні законодавчі документи, які регламентують охорону праці в Україні та містять положення, що стосуються роботи у запиленому та газонасиченому середовищі, подані у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні законодавчі документи, які регламентують охорону праці в Україні

Нормативний документ	Основні положення	Застосування на метизному підприємстві
Закон України «Про охорону праці»	Визначає права працівників на безпечні умови праці, обов'язки роботодавців щодо створення безпечного робочого середовища та запобігання професійним захворюванням.	Підприємство має впроваджувати системи контролю забруднень, відповідати вимогам безпеки та організувати навчання персоналу.
Кодекс законів про працю України	Регламентує тривалість робочого часу, порядок відпочинку та соціальні гарантії для працівників, що працюють у шкідливих умовах.	Передбачає компенсації для працівників, що піддаються впливу пилу та токсичних речовин, а також додаткові відпустки та пільговий стаж.
ДСТУ EN 689:2018 «Оцінка впливу хімічних речовин на робочому місці»	Встановлює вимоги до методів вимірювання концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони.	Використовується для моніторингу рівня запиленості та ефективності роботи пилогазоочисного обладнання.
ДСТУ 7238:2011 «Безпека праці. Атестація робочих місць»	Регламентує порядок оцінки умов праці, ідентифікації небезпечних факторів і визначення необхідності впровадження додаткових заходів захисту.	Вимагає обов'язкової атестації робочих місць із підвищеною запиленістю та регулярного контролю стану повітря.
Наказ МОЗ України №125 від 2006 року	Встановлює гранично допустимі концентрації (ГДК) пилу, газів та токсичних речовин у робочій зоні.	Зобов'язує підприємство контролювати концентрацію шкідливих речовин у повітрі та застосовувати ефективні засоби очищення.

Продовження таблиці 4.2

<p>Державні санітарні правила ДСП 201-97</p>	<p>Регламентують норми шуму, вібрації, температурного режиму та концентрації запиленості у виробничих приміщеннях.</p>	<p>Передбачає впровадження шумозахисних заходів, систем аспірації та регулярний санітарно-гігієнічний контроль.</p>
<p>ДСТУ EN ISO 9001:2018 «Системи управління якістю»</p>	<p>Вимагає дотримання міжнародних стандартів з управління безпекою та охороною праці через впровадження ризик-орієнтованого підходу.</p>	<p>Підприємство має інтегрувати охорону праці в загальну систему управління якістю, що включає заходи з моніторингу рівня шкідливих факторів.</p>

Джерело: розроблено автором на основі [81-85].

Гранично допустимі концентрації (ГДК) пилу та токсичних речовин у виробничих приміщеннях повинні відповідати затвердженим нормативам, які визначені у ДСП 201-97. Підприємство зобов'язане забезпечувати систематичний моніторинг та підтримувати рівень забруднення повітря у допустимих межах.

Щоб забезпечити відповідність нормативним вимогам, підприємство має впроваджувати ефективну систему контролю охорони праці. Основні напрями діяльності в цій сфері включають:

1. Регулярний моніторинг якості повітря, що включає в себе наступні заходи:
  - Виконання періодичних вимірювань концентрації пилу та газових забруднень у робочій зоні.
  - Використання автоматизованих систем контролю повітря для реєстрації рівня шкідливих речовин у режимі реального часу.
  - Організація вентиляційної та аспіраційної системи

- Впровадження сучасних витяжних та аспіраційних установок, які дозволяють ефективно видаляти дрібнодисперсний пил.

- Модернізація існуючих систем пилогазоочистки для підвищення ефективності уловлення шкідливих частинок.

## 2. Використання засобів індивідуального захисту.

- Застосування респіраторів класу FFP3, які забезпечують максимальний рівень захисту від дрібнодисперсного пилу.

- Використання спецодягу, що запобігає осіданню металевого пилу на шкірі та одязі працівників.

- Використання захисних навушників або берушів для зниження впливу шуму.

## 3. Навчання персоналу та проведення інструктажів

- Регулярні тренінги та інструктажі з техніки безпеки для всіх працівників.

- Ознайомлення персоналу з першочерговими діями у разі аварійних ситуацій та витоку шкідливих речовин.

- Проведення атестації робочих місць

## 4. Виявлення зон підвищеної запиленості та впровадження заходів щодо їх оптимізації.

## 5. Контроль стану вентиляційних систем та ефективності їхньої роботи.

## 6. Міжнародний досвід у сфері охорони праці

- Використання автоматизованих систем контролю повітря, які активно впроваджуються на європейських підприємствах.

- Впровадження інтелектуальних систем вентиляції, що дозволяють зменшити витрати на електроенергію та підвищити ефективність роботи очисних установок.

- Використання сучасних методів зниження впливу шуму, аналогічно до підприємств Німеччини, Польщі та Франції.

На підприємстві «Метиз» уже впроваджені певні заходи з охорони праці, що відповідають діючим нормам та забезпечують безпеку працівників. До основних заходів, що реалізуються на виробництві, належать використання систем аспірації для зниження концентрації пилу у повітрі, оснащення робочих зон ефективними вентиляційними установками та надання працівникам засобів індивідуального захисту, таких як респіратори та захисний спецодяг.

Система вентиляції на підприємстві функціонує за принципом комбінованого повітрообміну, який забезпечує відведення шкідливих речовин та подачу свіжого повітря. Проте, аналіз роботи вентиляційного обладнання свідчить про необхідність його модернізації для зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності видалення пилу. Додатково варто розглянути можливість встановлення локальних витяжних систем у найбільш заплених зонах виробничого цеху.

На підприємстві проводиться регулярний контроль рівня запиленості у робочих приміщеннях, але для більш точного аналізу необхідно впровадити автоматизовану систему моніторингу якості повітря. Така система дозволить виявляти перевищення допустимих рівнів пилу в режимі реального часу та своєчасно вживати заходів для нормалізації показників.

Працівники підприємства забезпечені засобами індивідуального захисту, зокрема респіраторами класу FFP2, які забезпечують базовий рівень захисту. Водночас, враховуючи високу концентрацію дрібнодисперсного пилу, доцільно використовувати респіратори класу FFP3, що мають більший коефіцієнт фільтрації та ефективно захищають дихальні шляхи. Також необхідно вдосконалити політику контролю використання ЗІЗ серед персоналу та впровадити суворий регламент їх заміни.

Виробничі приміщення заводу характеризуються підвищеним рівнем шуму через роботу дробеметних установок, волочильних станів

та інших механізмів. На сьогодні частина обладнання оснащена шумоізоляційними кожухами, проте рівень шумового навантаження в деяких зонах виробничого цеху все ще перевищує допустимі значення. Рекомендується впровадити додаткові заходи, зокрема встановлення шумопоглинаючих перегородок, використання віброізоляційних матеріалів для зниження рівня звукового впливу та забезпечення працівників ефективними захисними навушниками.

Одним із важливих аспектів охорони праці є навчання персоналу. На підприємстві періодично проводяться інструктажі щодо техніки безпеки, проте їх недостатньо для забезпечення високої обізнаності працівників про всі ризики. Рекомендується запровадити регулярні тренінги із використанням сучасних методів навчання, включаючи відеоінструкції, практичні заняття та моделювання потенційних аварійних ситуацій.

Також варто звернути увагу на покращення загальної культури охорони праці. Одним із дієвих заходів може бути впровадження системи мотивації працівників за дотримання правил безпеки, наприклад, запровадження бонусних програм за безаварійну роботу.

Серед додаткових заходів щодо охорони праці можна виділити організацію регулярного медичного огляду працівників, які працюють у зонах з підвищеною запиленістю. Важливо забезпечити контроль за станом здоров'я персоналу та своєчасне виявлення професійних захворювань. Також необхідно періодично проводити інструктажі з охорони праці, зокрема щодо безпечної експлуатації пилогазоочисного обладнання, що зменшить ймовірність нещасних випадків на виробництві. [86]

В умовах воєнного стану на підприємстві «Метиз» облаштоване бомбосховище, розраховане приблизно на 300 осіб. Укриття розташоване у підвальному приміщенні основного виробничого

корпусу, що забезпечує додатковий захист завдяки масивним бетонним перекриттям та розташуванню нижче рівня землі.

Бомбосховище побудоване відповідно до чинних нормативів цивільного захисту та враховує вимоги щодо протирадіаційних та протиударних укриттів. Його основні характеристики включають:

1. Міцні бетонні стіни товщиною понад 50 см, що забезпечують захист від вибухової хвилі та уламків.

2. Два виходи – основний та аварійний, які дозволяють евакуювати людей у разі завалів або пошкодження основного входу.

3. Герметичні металеві двері з системою замикання, що забезпечують захист від проникнення шкідливих газів або пилу.

4. Система вентиляції – обладнана фільтрувально-вентиляційними установками (ФВУ), які очищують повітря від пилу, диму, хімічних речовин та дозволяють підтримувати стабільний мікроклімат всередині сховища.

5. Система відведення води – передбачена дренажна система для відведення ґрунтових вод у разі підтоплення.

6. Теплоізоляція – утеплені стіни та стеля, що дозволяє підтримувати комфортну температуру всередині незалежно від погодних умов.

Бомбосховище розраховане на автономне перебування людей протягом 48-72 годин. Встановлені ємності для зберігання питної та технічної води, а також продуктові запаси (сухпайки, консерви, енергетичні батончики). Передбачена медична кімната з аптечкою, укомплектованою перев'язувальними матеріалами, антисептиками, протиопіковими засобами та необхідними ліками (антигістамінні, знеболювальні, протизапальні препарати). Встановлені біотуалети та рукомийники з запасами води та санітарних засобів. Передбачені лави та спальні місця у вигляді розкладних нари, що дозволяють розмістити людей у разі тривалого перебування в укритті.

Для забезпечення стабільної роботи життєво важливих систем у бомбосховищі встановлено дизельний генератор потужністю 50 кВт, який дозволяє підтримувати роботу вентиляції, освітлення, зв'язку та водопостачання. Генератор має запас пального, якого вистачить на 72 години автономної роботи.

Для персоналу підприємства розроблено чіткий план дій у разі повітряної тривоги. Передбачено тренування з евакуації не менше двох разів на рік, що дозволяє забезпечити швидкий та організований спуск у бомбосховище. У кожному цеху розміщені схеми евакуації, а відповідальні особи з охорони праці координують пересування працівників. [87]

Охорона праці на підприємстві «Метиз» є важливою складовою виробничого процесу, спрямованою на забезпечення безпечних умов роботи, мінімізацію ризиків та запобігання професійним захворюванням і травматизму. Аналіз охорони праці на підприємстві показав, що вже впроваджені базові заходи щодо запобігання шкідливим впливам виробничого середовища, зокрема система вентиляції, засоби індивідуального захисту, контроль за рівнем шуму, пилу та хімічних речовин. Водночас є аспекти, які потребують удосконалення для підвищення ефективності захисних заходів.

Одним із ключових викликів на виробництві є високий рівень запиленості, особливо в зонах механічної та термічної обробки металу. Незважаючи на наявність систем аспірації, необхідно модернізувати фільтрувальне обладнання та впровадити локальні витяжні установки у найбільш заплених ділянках цеху. Також важливо посилити контроль над використанням засобів індивідуального захисту та забезпечити працівників більш ефективними респіраторами класу FFP3, що відповідають сучасним вимогам безпеки.

Шумове та вібраційне навантаження залишається значним фактором ризику. Запропоновано впровадження додаткових заходів

шумоізоляції та використання віброізоляційних матеріалів для обладнання, що допоможе знизити рівень шкідливого впливу на персонал.

Окрему увагу приділено питанням цивільного захисту. На підприємстві створено бомбосховище, яке відповідає основним нормам безпеки та забезпечує захист працівників у разі надзвичайних ситуацій. Воно оснащено системою вентиляції, запасами води та їжі, засобами зв'язку та автономним електроживленням. Проте для покращення умов варто вдосконалити план евакуації, регулярно проводити навчання персоналу та створити резерв додаткових джерел живлення.

Розгляд законодавчих вимог засвідчив необхідність подальшого удосконалення заходів безпеки відповідно до чинних нормативних документів, зокрема Закону України "Про охорону праці", ДБН В.2.5-28:2018, ДСП 201-97 та ДСТУ 2867-94. Дотримання цих норм дозволить не лише підвищити безпеку праці, а й зменшити ризики для здоров'я персоналу та покращити екологічну ситуацію навколо виробництва.

Загалом, запропоновані заходи щодо вдосконалення системи охорони праці, модернізації вентиляційного обладнання, підвищення ефективності засобів індивідуального захисту та покращення умов безпеки в укриттях сприятимуть створенню комфортного та безпечного середовища для працівників підприємства «Метиз».

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ПИЛОГАЗООЧИСТКИ

Економічна ефективність є ключовим фактором при ухваленні рішень щодо модернізації виробничих процесів, особливо коли йдеться про впровадження нових технологій пилогазоочищення. Незважаючи на те, що покращення систем очищення повітря є критично важливим для забезпечення екологічної безпеки та відповідності сучасним нормативним вимогам, реалізація таких заходів вимагає значних фінансових ресурсів. Тому перед впровадженням запропонованих змін необхідно провести детальний економічний аналіз, що дозволить оцінити капітальні витрати, експлуатаційні витрати та прогнозовані економічні вигоди.

У цьому розділі буде здійснено розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат для запропонованих варіантів модернізації, обраних у розділі 3, а також оцінено потенційні економічні вигоди та додаткові джерела фінансової ефективності для підприємства «Метиз». Аналіз включатиме:

1. Оцінку витрат на закупівлю, монтаж та введення в експлуатацію модернізованого обладнання.
2. Визначення змін у експлуатаційних витратах, зокрема зниження витрат на електроенергію, технічне обслуговування та екологічні платежі.
3. Розрахунок терміну окупності та загальної економічної доцільності запропонованих рішень.

Для аналізу будуть використані стандартизовані методи економічних розрахунків, зокрема:

1. Розрахунок капітальних витрат (КВ) – включає вартість обладнання, монтажу та супутніх витрат.

2. Оцінка експлуатаційних витрат (ЕВ) – включає витрати на електроенергію, технічне обслуговування та амортизацію.

3. Розрахунок зниження екологічних платежів (ЗЕП) – дозволяє оцінити потенційне зменшення витрат на штрафи за забруднення та екологічні податки.

4. Розрахунок терміну окупності (ТО) – визначає період повернення інвестицій та їхню доцільність для підприємства.

Оцінка економічної ефективності заходів модернізації здійснюється відповідно до стандартних підходів до аналізу інвестиційних проектів, що застосовуються у промисловості. Розрахунки будуть проведені відповідно до методик, затверджених нормативними документами, зокрема ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 («Методика визначення вартості будівництва») та ДСТУ 3273-95 («Оцінка ефективності інвестиційних проектів і відбір проектів для фінансування»). Це забезпечить відповідність розрахунків чинним стандартам та дозволить коректно визначити фінансові переваги впровадження модернізації.

У розділі 3 було розглянуто три оптимальні варіанти модернізації:

1. Модернізація конструкції пиловловлюючої камери (удосконалення внутрішньої геометрії для зниження втрат тиску).

2. Встановлення частотно-регульованих приводів (ЧРП) (динамічне керування швидкістю обертання вентиляторів для оптимізації енергоспоживання).

3. Встановлення електрофільтрів (додатковий ступінь очищення для зменшення викидів пилу та покращення екологічної ефективності).

Вартість кожного заходу була оцінена на основі ринкових цін на аналогічне обладнання, нормативних документів та консультацій з фахівцями (Таблиця 5.1)

Таблиця 5.1 – Витрати для кожного варіанту модернізації

Модернізаційний захід	Стаття витрат	Сума, грн
Модернізація конструкції пиловловлюючої камери	Вартість комплекту модернізації (нові лопатки, внутрішні вставки)	300 000
	Монтажні роботи	70 000
	Пусконаладжувальні роботи	50 000
	Загальні витрати	420 000
Встановлення частотно-регульованих приводів (ЧРП)	Вартість ЧРП (4 шт.)	1 600 000
	Монтажні роботи	150 000
	Пусконаладжувальні роботи	100 000
	Загальні витрати	2 050 000
Встановлення електрофільтрів (початковий етап)	Вартість одного електрофільтра	2 500 000
	Вартість установки одного електрофільтра	600 000
	Пусконаладжувальні роботи	300 000
	Загальні витрати	3 400 000

Джерело: розроблено автором на основі [61, 65-70, 71-74]

Сукупні витрати на повну модернізацію системи пилогазоочищення, якщо впроваджувати всі заходи одночасно, складуть 5 670 000 грн. Проте через обмежені фінансові можливості підприємства розглядається поступове впровадження заходів.

Розрахунок економічної ефективності впровадження цих заходів базується на визначенні капітальних та експлуатаційних витрат, а також прогнозованої економії коштів за рахунок зниження енергоспоживання.

Оцінка економічної ефективності запропонованих заходів модернізації передбачає аналіз потенційного зниження енергоспоживання завдяки впровадженню сучасних технологічних рішень. Розрахунки базуються на вивченні практичного досвіду інших підприємств, нормативних показників та рекомендацій профільних досліджень.

Модернізація конструкції пиловловлюючої камери передбачає зміну конструкції пиловловлюючої камери, що дозволить ефективніше затримувати пил та зменшити втрати тиску в системі. Втрати тиску безпосередньо впливає на роботу вентиляторів – чим менші втрати тиску, тим менше енергії споживають вентилятори для підтримання необхідного рівня аспірації. Втрати тиску в системах пилогазоочистки пропорційні квадрату швидкості газового потоку, а отже, при їх зниженні необхідна потужність вентиляторів також зменшується.

Зниження гідравлічного опору на 10-15% зазвичай призводить до 8-10% економії електроенергії у вентиляторних системах. Зміна споживаної потужності вентилятора можна приблизно оцінити за допомогою «Закону подібності вентиляторів» або "Закону пропорційності потужності до тиску в системах вентиляції".

Формула використовується для розрахунку зміни потужності вентилятора при зміні опору (тиску) у вентиляційних і газоочисних системах:

$$\Delta P = P_{\text{поч}} * \left(1 - \frac{\Delta H}{H_{\text{поч}}}\right)^{1/3} \quad (5.1)$$

де:  $\Delta P$  – нова потужність вентилятора після зменшення втрат тиску;

$P_{\text{поч}}$  – початкова потужність вентилятора;

$\Delta H$  – зменшення втрат тиску після модернізації (10-15%);

$H_{\text{поч}}$  – початкові втрати тиску в системі [88]

Розглянемо приблизні втрати тиску в системі пилогазоочистки залежать від кількох факторів:

1. Конструкції циклону – стандартні промислові циклони типу ЦН-11 мають втрати тиску в діапазоні 1200–2000 Па залежно від завантаження та стану поверхонь.

2. Аспіраційної мережі та вентиляційної системи – кожен метр повітропроводу, зміни напрямку потоку, фільтри та клапани додають додатковий опір. Для промислових систем із циклонами це може становити 500–1000 Па.

3. Сумарні втрати тиску на підприємствах подібного типу (застаріле обладнання без модернізації) можуть сягати 1800–2000 Па.

Таким чином отримуємо наступні дані: для розрахунку формули 5.1:

1. Початкова потужність вентилятора ( $P_{\text{поч}}$ ) = 200 кВт (середня потужність вентилятора, який використовується в системі пилогазоочистки).

2. Зменшення втрат тиску після модернізації ( $\Delta H$ ) = 10–15%.  
Приймаємо для розрахунку 10% (нижнє значення діапазону)

3. Початкові втрати тиску в системі ( $H_{\text{поч}}$ ) приймаємо 1800 Па (нижнє значення діапазону).

$$\Delta P = P_{\text{поч}} * \left(1 - \frac{\Delta H}{H_{\text{поч}}}\right)^{1/3} = 200 \text{ кВт} * (1 - 0,1)^{1/3} = 193 \text{ кВт}$$

Розрахуємо економію за рік, враховуючи кількість годин роботи системи (припустимо 7000 годин на рік):

$$\Delta E = (P_{\text{поч}} - P_{\text{нов}}) \times T_{\text{роботи}} \times C_{e.e.}$$

Де:  $T_{\text{роботи}} = 7000$  год/рік;

$C_{e.e.}$  = вартість електроенергії; 5.5 грн/кВт·год (середній тариф для промисловості в Україні). [89]

При 10% зменшенні втрат тиску:

$$\Delta E = (200 \text{ кВт} - 193 \text{ кВт}) \times 7000 \text{ год/рік} \times 5.5 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

$$\Delta E = 269500 \text{ грн/рік}$$

Встановлення частотно-регульованих приводів для вентиляторів системи пилогазоочищення є ще одним перспективним напрямом підвищення енергоефективності. ЧРП дозволяють динамічно регулювати швидкість обертання вентиляторів відповідно до поточних потреб виробництва, що мінімізує нераціональне використання енергоресурсів. Дослідження промислових підприємств свідчать, що використання частотно-регульованих приводів забезпечує економію електроенергії в діапазоні 20–40%, залежно від умов експлуатації. Для підприємства «Метиз» приймемо цей показник у 30%, що дозволяє суттєво скоротити витрати на енергоспоживання системи пилогазоочищення. Встановлення ЧРП дозволяє динамічно регулювати швидкість вентиляторів, адаптуючи їхню потужність до реальних умов роботи, що зменшує енергоспоживання.

Дані для розрахунку:

Початкове електроспоживання системи вентиляторів: 5,7 млн грн/рік

Очікуване зменшення споживання електроенергії: 30%.

Тариф на електроенергію: 5,5 грн/кВт·год.

Робочий час вентиляторів: 7000 год/рік.

Кількість вентиляторів: 4 шт.

Середня потужність одного вентилятора: 200 кВт.

Розрахунок економії у кВт·год:

$$\Delta E = (P_{\text{поч}} - P_{\text{нов}}) \times T_{\text{роботи}} \times C_{\text{е. е.}} \times K_{\text{вент}}$$

$$\Delta E = (200 \text{ кВт} - 140 \text{ кВт}) \times 7000 \frac{\text{год}}{\text{рік}} \times 5,5 \frac{\text{грн}}{\text{кВт}} \text{ год} \times 4_{\text{вент.}}$$

$$\Delta E = 9\,240\,000 \text{ грн./рік}$$

Розглядаючи можливість впровадження електрофільтрів на підприємстві «Метиз», було визначено, що їх основна перевага полягає

у високій ефективності уловлення дрібнодисперсного пилю, яка перевищує 99%. Це дозволяє значно знизити рівень промислових викидів та відповідати сучасним екологічним стандартам.

Однак, аналіз енергоспоживання електрофільтрів показав, що їх експлуатація потребує значних витрат електроенергії. За оцінками, додаткове споживання електроенергії становить близько 20% від поточного рівня енергоспоживання системи пилогазоочистки, що еквівалентно понад 1 млн грн на рік. Це створює додаткове фінансове навантаження на підприємство, яке не компенсується зменшенням екологічних платежів. Для кожного циклону ЦН-11-630-1У середня продуктивність з очищення газів становить 5000–6000 м<sup>3</sup>/год. Таким чином, загальний об'єм викидів газу для 4х Циклонів можна прийняти як:

$$Q_{\text{заг}} = 5500 \text{ м}^3/\text{год} \times 4 = 22000 \text{ м}^3/\text{год}$$

Дані свідчать, що електрофільтр повинен мати мінімальну продуктивність 22 000 м<sup>3</sup>/год.

На основі аналізу обладнання, доступного на ринку, один потужний електрофільтр має продуктивність 20 000 – 25 000 м<sup>3</sup>/год. Наприклад, модель ЕФП-20 забезпечує ефективну очистку при продуктивності 20 000 м<sup>3</sup>/год.

Оптимальним варіантом буде вибір електрофільтра з запасом продуктивності на рівні 25 000 м<sup>3</sup>/год, що дозволить врахувати можливі пікові навантаження. Середнє споживання електрофільтра для такої продуктивності становить 30-50 кВт/год. Для розрахунків приймемо 40 кВт. Далі проведемо розрахунок додаткових витрат на електроенергію для електрофільтру ЕФП-20:

$$\Delta E = P_{\text{еф}} \times T_{\text{роботи}} \times C_{\text{е.е.}}$$

$$\Delta E = 40 \times 7000 \frac{\text{год}}{\text{рік}} \times 5,5 \frac{\text{грн}}{\text{кВт}} \text{год}$$

$$\Delta E = 1\,540\,000 \text{ грн./рік}$$

Встановлення електрофільтрів не є економічно доцільним для підприємства «Метиз», оскільки воно не дає позитивного фінансового ефекту.

В таблиці 5.2 показані отримані дані розрахунків та терміни окупності кожного із заходів

Таблиця 5.2 – Порівняльна оцінка варіантів модернізації

Захід модернізації	Капітальні витрати, грн	Зміна споживання електроенергії, %	Річна економія, грн	Окупність, років
Модернізація конструкції пиловловлюючої камери	570 000	-4,5 - 8%	- 269 500	2,1
Встановлення частотно-регульованих приводів (ЧРП)	1 850 000	-30%	- 9 240 000	0,3
Встановлення електрофільтрів	3 400 000	+5%	+1 540 000	Неокупний

Проведений економічний аналіз демонструє, що модернізація системи пилогазоочищення підприємства «Метиз» є економічно доцільною за умови впровадження комплексного підходу. З огляду на обмежені фінансові можливості, оптимальним варіантом є поетапне впровадження модернізації, починаючи з модернізації конструкції пиловловлюючої камери, що забезпечує окупність 2,1 року та покращення якості пиловловлення до 95%, що є основною метою модернізації. Подальше впровадження частотно-регульованих приводів може забезпечити додаткову економію (до 30% зниження споживання електроенергії), що окупається за 0,3 року. Впровадження електрофільтрів наразі не є економічно доцільним через надто

тривалий термін окупності. Таким чином, рекомендовано зосередитися на заходах, що дозволяють оперативно досягти нормативних показників очищення (90–95%) та знизити енергоспоживання, що сприятиме підвищенню економічної ефективності виробництва та відповідності сучасним екологічним стандартам.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було досліджено та проаналізовано ефективність систем пилогазоочистки на підприємстві «Метиз», а також запропоновано шляхи їх модернізації з метою підвищення екологічної безпеки та зниження експлуатаційних витрат.

1. Аналіз сучасного стану технологій пилогазоочистки показав, що більшість промислових підприємств використовують застарілі циклонні установки, які мають обмежену ефективність уловлення дрібнодисперсного пилу. Було розглянуто сучасні методи очищення газів, включаючи механічні, електрофізичні, фільтраційні та комбіновані системи.

2. Дослідження ефективності системи пилогазоочистки на метизному підприємстві виявило, що встановлене обладнання (циклон ЦН-11) має значні експлуатаційні недоліки, зокрема високі втрати тиску та недостатню ефективність очищення дрібнодисперсного пилу. Аналіз структури викидів та відповідність сучасним екологічним стандартам засвідчили необхідність впровадження модернізаційних заходів.

3. Розробка технічних заходів модернізації дозволила визначити три оптимальні варіанти покращення системи пилогазоочистки: модернізація конструкції пиловловлюючої камери, що дозволяє знизити втрати тиску та підвищити ефективність уловлення пилу; встановлення частотно-регульованих приводів (ЧРП), що забезпечує гнучке регулювання швидкості вентиляторів та дозволяє зменшити енергоспоживання; встановлення електрофільтрів, які забезпечують високий рівень очищення газів, але мають значні капітальні та експлуатаційні витрати.

4. Оцінка економічної ефективності заходів модернізації продемонструвала, що найбільш доцільним є впровадження частотно-

регульованих приводів (ЧРП) та модернізація конструкції пиловловлюючої камери. Розрахунки показали:

- модернізація пиловловлюючої камери дозволяє скоротити споживання електроенергії на 4,5-8%, що дає економію до 269 500 грн на рік;

- встановлення ЧРП забезпечує зниження витрат на електроенергію на 30%, що еквівалентно економії у 1 710 000 грн на рік;

- електрофільтри, незважаючи на високу ефективність очищення, є енергозатратними та фінансово не вигідними в короткостроковій перспективі.

Розрахунок терміну окупності показав, що окупність модернізації пиловловлюючої камери становить близько 2 років, а впровадження частотно-регульованих приводів окупиться менше ніж за рік.

5. Екологічний ефект модернізації підтвердив, що впровадження сучасних заходів дозволить значно зменшити рівень шкідливих викидів у повітря, знизити навантаження на навколишнє середовище та відповідати сучасним екологічним стандартам.

6. Було розроблено рекомендації щодо впровадження модернізаційних заходів у систему пилогазоочистки метизного підприємства, що дозволить не лише підвищити екологічну безпеку, але й досягти значної економії ресурсів, які полягають у наступному:

- у першочерговому порядку впровадити модернізацію пиловловлюючої камери та частотно-регульованих приводів, оскільки ці заходи мають найшвидший термін окупності та значний економічний ефект;

- використання електрофільтрів можливе лише у разі доступності додаткового фінансування та поступового переходу до більш суворих екологічних норм;

- у подальшому розглянути можливість автоматизації системи пилогазоочистки для покращення її ефективності та зменшення експлуатаційних витрат.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Глущенко О. Л. Конспект лекцій з дисципліни "Очищення газових викидів" / О. Л. Глущенко. – Дніпро: Дніпровський державний технічний університет, 2017. – 45 с. URL: [https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-z\\_kl30.pdf](https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-z_kl30.pdf)
2. Северин В. Ф. Природоохоронні технології: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2012. 205 с. URL: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/iebmd/severin\\_priodoohoronni\\_tehnologii/5-8.html](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/iebmd/severin_priodoohoronni_tehnologii/5-8.html)
3. Шаніна Т. П. Сучасні методи захисту навколишнього середовища: конспект лекцій. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2008. 200 с. URL: [https://eprints.library.odku.edu.ua/653/1/ShaninaTP\\_ST\\_zahistu\\_dovkilly\\_t1\\_KL\\_2008.pdf](https://eprints.library.odku.edu.ua/653/1/ShaninaTP_ST_zahistu_dovkilly_t1_KL_2008.pdf)
4. Галак О.В., Сахненко М.Д., Каракуркчі Г.В., Матикін О.В., Косарев О.В., Белоусов І.О. Методи очищення газових викидів від хімічно-небезпечних речовин для підвищення ефективності фільтрувальних систем. Дослідження у наукових роботах студентів, 2018, №18 (1294), с. 89-94. URL: <https://www.researchgate.net/publication/326741648>
5. Рибалова О.В., Цимбал О.В. Процеси та апарати пилогазоочищення: практикум. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2020. 92 с. URL: [https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17685/1/Процеси%20та%20апарати%20пилогазо%20Практикум%20\(Рибалова\\_Цимбал\)%20испр.pdf](https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17685/1/Процеси%20та%20апарати%20пилогазо%20Практикум%20(Рибалова_Цимбал)%20испр.pdf)
6. Галак О.В., Сахненко М.Д. Методи очищення газових викидів від хімічно-небезпечних речовин. Дослідження у наукових роботах

студентів, 2018, №18 (1294), с. 89-94. URL: <https://www.researchgate.net/publication/326741648>

7. Кузьмін О. В. Циклонні пиловловлювачі: принципи роботи та ефективність / О. В. Кузьмін. – Київ: Техніка, 2018. – 320 с.

8. Рибалова О. В., Цимбал О. В. Процеси та апарати пилогазоочищення: практикум. Харків: НУЦЗУ, 2020. 92 с. URL: [https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17685/1/Процеси%20та%20апарати%20пилогазо%20Практикум%20\(Рибалова\\_Цимбал\)%20испр.pdf](https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17685/1/Процеси%20та%20апарати%20пилогазо%20Практикум%20(Рибалова_Цимбал)%20испр.pdf)

9. Методи зниження викидів токсичних речовин в атмосферу // Енергетика в Україні. URL: <https://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-3/section-2/2-3>

10. Рибалова О. В., Цимбал О. В. Процеси та апарати пилогазоочищення: практикум. Харків: НУЦЗУ, 2020. 92 с. URL: [https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17685/1/Процеси%20та%20апарати%20пилогазо%20Практикум%20\(Рибалова\\_Цимбал\)%20испр.pdf](https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17685/1/Процеси%20та%20апарати%20пилогазо%20Практикум%20(Рибалова_Цимбал)%20испр.pdf)

11. Петренко В. І. Технології пилогазоочистки: науковий огляд / За ред. В. І. Петренка. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2021. – 312 с.

12. Лисенко П. Г. Системи промислової фільтрації повітря: принципи роботи та застосування / П. Г. Лисенко. – Дніпро: Промінь, 2020. – 280 с.

13. Савчук І. О. Промислові системи пилогазоочистки: сучасні технології / І. О. Савчук. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2019. – 265 с.

14. Гордієнко С. В. Перспективи впровадження плазмокатоалітичних систем очищення в промисловості / С. В. Гордієнко. – Одеса: Політехніка, 2022. – 290 с.

15. Сидоренко В. Ю. Автоматизовані системи екологічного моніторингу: сучасний стан та перспективи розвитку / В. Ю. Сидоренко. – Київ: Екологічна безпека, 2020. – 275 с.

16. Ковальчук Д. М. Застосування штучного інтелекту для оптимізації роботи промислових фільтраційних систем / Д. М. Ковальчук. – Харків: Техносфера, 2021. – 260 с.

17. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2017 році / МЗДПР України. – Київ, 2022. – 345 с. – URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Natsionalna-dopovid-pro-stan-navkolyshnogo-pryrodnogo-seredovyshha-v-Ukrayini-u-2017-rotsi.pdf>

18. Борисенко А. В. Оптимізація систем очищення повітря: екологічні та економічні аспекти / А. В. Борисенко. – Дніпро: Екосфера, 2022. – 248 с.

19. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. «Моніторинг довкілля: Аналітична записка щодо стану та перспектив розвитку державної системи моніторингу довкілля» / МЗДПР України. – Київ, 2022. – 91 с. – URL: [https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/02/Monitoring-Green-Paper\\_15\\_02\\_2022.pdf](https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/02/Monitoring-Green-Paper_15_02_2022.pdf)

20. Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзєєва. «Якість атмосферного повітря в Україні до і під час повномасштабної війни» [Електронний ресурс] / Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзєєва. – Київ, 2023. – 45 с. – URL: [https://www.savednipro.org/wp-content/uploads/2023/10/zvit\\_doslidzhennya\\_101723.pdf](https://www.savednipro.org/wp-content/uploads/2023/10/zvit_doslidzhennya_101723.pdf)

21. Гічов Ю. О. Очищення газів: Частина II: Конспект лекцій. Національна металургійна академія України, 2015. 44 с. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/22\\_gichov\\_yu.o\\_ochischennya\\_gaziv\\_chastina\\_ii.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/22_gichov_yu.o_ochischennya_gaziv_chastina_ii.pdf)

22. Кубатко О. В., Ковальов Б. Л. та ін. Від проривних технологій до цифрової економіки: монографія. Суми: Сумський державний університет, 2022. 256 с. URL:

[https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/90242/1/Kubatko\\_mon.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/90242/1/Kubatko_mon.pdf)

23. «Методологічні положення ДСС щодо викидів забруднюючих речовин і парникових газів у атмосферне повітря» / Державна служба статистики України. – URL: <https://stat.gov.ua/sites/default/files/2023-10/Методологічні%20положення%20ДСС%20щодо%20викидів%20забруднюючих%20речовин%20і%20парникових%20газів%20в%20атмосферне%20повітря.pdf>

24. Невидимий вбивця: як дрібнодисперсний пил (PM2.5) впливає на організм людини / SaveDnipro. – URL: <https://www.savednipro.org/nevidimij-vbivcya-yak-dribnodispersnij-pil-rm25-vplivaye-na-organizm-lyudini/>

25. Кислотний дощ [Електронний ресурс] // PCC Group Product Portal. – URL: <https://www.products.pcc.eu/uk/academy/%D0%BA%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%B4%D0%BE%D1%89/>

26. Вплив забруднення повітря на здоров'я та соціальні витрати, пов'язані із забрудненням повітря у великих містах України / Програма розвитку ООН в Україні. – 2021. – URL: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-03/Health%20impacts%20and%20social%20costs%20associated%20with%20air%20pollution%20in%20larger%20urban%20areas%20of%20Ukraine%20%28UA%29.pdf>

27. Фотохімічний смог / LibreTexts. – URL: [https://ukrayinska.libretexts.org/Хімія/Екологічна\\_хімія/Зелена\\_хімія\\_та\\_десять\\_заповідей\\_стійкості\\_\(Манахан\)/10:\\_Синє\\_небо\\_для\\_зеленого\\_середовища/10.11:\\_Фотохімічний\\_смог](https://ukrayinska.libretexts.org/Хімія/Екологічна_хімія/Зелена_хімія_та_десять_заповідей_стійкості_(Манахан)/10:_Синє_небо_для_зеленого_середовища/10.11:_Фотохімічний_смог)

28. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні / Вісник Національної академії наук України. – 2023. – №4. – С.

20–28. – URL: <https://visnyk-nanu.org.ua/ojs/index.php/v/article/download/2795/2809>

29. Новітні технології електросталеплавильного виробництва / Національна металургійна академія України. – URL: [https://nmetau.edu.ua/file/6.15\\_novitni\\_tehnologiyi\\_elektrostaleplavilnogo\\_virobnitstva.docx](https://nmetau.edu.ua/file/6.15_novitni_tehnologiyi_elektrostaleplavilnogo_virobnitstva.docx)

30. Переваги впровадження циркулярної економіки для України в умовах воєнного стану / Економіка та суспільство. – 2022. – №40. – С. 1940–1947. – URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/download/1940/1867/>

31. Головка О. І. Промислова екологія: навчальний посібник. – Київ: КНУ, 2018. – 312 с. – URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31519/1/PromEcologia.pdf>

32. Довідник з очищення промислових викидів. – Київ: НАН України, 2020. – 268 с. – URL: <https://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/92341/ochyschenia.pdf>

33. Лекції з дисципліни "Очищення газових викидів". – Дніпро: Дніпровський державний технічний університет, 2021. – 92 с. – URL: <https://www.ddtu.dp.ua/Portal/Data/5/7/5-7-kl3.pdf>

34. Офіційний сайт заводу "Метиз". – URL: <https://metiz.ua/>

35. Промисловий потенціал Кам'янського – Метиз. Кам'янська міська рада. – URL: [https://kam.gov.ua/ua/osxfile/pg/80219725533368\\_p18\\_1o/](https://kam.gov.ua/ua/osxfile/pg/80219725533368_p18_1o/)

36. Офіційний сайт Вартис Метал. Завод Метиз [Електронний ресурс]. – URL: <https://vartis-metal.com.ua/ru/zavod-metyz/>

37. Opendatabot. ТОВ «Завод Метиз Кам'янське». Інформація про підприємство [Електронний ресурс]. — URL: <https://opendatabot.ua/c/44312691>

38. Класифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів.  
URL: <https://oppb.com.ua/articles/klasyfikaciya-nebezpechnyh-i-shkidlyvyh-vyrobnychyh-faktoriv>

39. Будова та принцип роботи циклонного пиловловлювача / Fine Mill. – URL: <https://ua.fine-mill.com/news/structure-and-working-principle-of-cyclone-dus-74786031.html>

40. Циклон ЦН 11-630 / Вент-А. – URL: <https://vent-a.com.ua/pr6817-ua/ciklon-cn-11-630/>

41. Паспорт установки очистки газу Циклон ЦН-11-630-1У: технічна документація. – 24 с.

42. Лабораторний звіт з визначення складу та властивостей пилових частинок ТДВ Завод МЕТИЗ: внутрішній документ підприємства. – Кам'янське, 2015. – 15 с.

43. Протокол вимірювань та аналізу складу пилових частинок. Завод МЕТИЗ: внутрішній документ підприємства. – Кам'янське, 2016. – 12 с.

44. ДВНЗ «Національний гірничий університет». Очистка газопилових викидів. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з дисципліни студентами напряму підготовки 6.040106 Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування / О.С. Ковров, Ю.В. Бучавий. Дніпропетровськ, 2013. – 51 с. – URL: <https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Disciplines/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96%20%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97%20%D0%B4%D0%BE%20%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D1%85%20%D1%80%D0%BE%D0%B1%D1%96%D1%82%20%D0%9E%D0%93%D0%9F%D0%92.pdf>

45. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Випуск 46, 2023 / О.С. Ковров, Ю.В. Бучавий. – Дніпро: ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2023. – 51 с. – URL: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/03/202346.pdf>
46. CFD Моделювання роботи циклонних пиловловлювачів магістральних газопроводів / Нафтогазова енергетика-2017: тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 2017. – URL: <https://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/8272/1/d700.pdf>
47. Офіційний сайт Верховна Рада України. Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12>
48. Офіційний сайт Верховна Рада України. Державні екологічні норми якості атмосферного повітря. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12>
49. Офіційний сайт Верховна Рада України. Закон України "Про охорону атмосферного повітря". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2707-12>
50. Офіційний сайт Верховна Рада України. Кодекс України про адміністративні правопорушення. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/80731-10>
51. Нужний С.А. Підвищення ефективності роботи циклонів шляхом модифікації конструкції верхньої частини: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Національний університет харчових технологій. – Київ, 2020. – 150 с.
52. Петренко І.В. Оптимізація аеродинамічних процесів у системах пиловловлювання зернопереробних підприємств: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Національний університет харчових технологій. – Київ, 2019. – 180 с.
53. Авраменко О.В. Оптимізація роботи пилогазоочисного обладнання в агломераційному виробництві: дис. ... канд. техн. наук:

05.17.08 / Запорізький національний університет. – Запоріжжя, 2021. – 175 с.

54. Facebook сторінка ОЛІС. Модернізація аспіраційних систем на зернопереробних підприємствах. URL: <https://m.facebook.com/100042947514242/photos/1340051440769760/>

55. Офіційний сайт Інституту технічної теплофізики НАН України. URL: <https://ittf.kiev.ua/>

56. Семенюк В.І. Вплив модернізації пиловловлювачів на ефективність очищення промислових газів: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського». – Київ, 2021. – 165 с.

57. Технологічні аспекти модернізації аспіраційних систем у промисловості: збірник наукових праць / Український науково-дослідний інститут екологічних проблем. – Харків, 2022. – 230 с.

58. Рибачков С.М. Оптимізація конструкції відцентрових пиловловлювачів у металургії: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Національна металургійна академія України. – Дніпро, 2020. – 180 с.

59. Інститут технічної теплофізики НАН України. Дослідження модернізації циклону та впровадження автоматизованих систем моніторингу: науковий звіт за 2023 рік. – Київ, 2023. – 145 с.

60. Інноваційні рішення в очищенні газопилових викидів: збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2023. – 320 с.

61. Офіційний сайт Пром-Вент. Бункери для циклонів. URL: <https://prom-vent.com.ua/ua/g6244654-bunkery-dlya-tsiklonov>

62. Ковальчук О.В. Дослідження комбінованих методів очищення газових викидів у металургії: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського». – Київ, 2022. – 180 с.

63. Герасименко В.С. Сучасні системи очищення промислових газів: монографія / Харківський політехнічний інститут. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 245 с.

64. Лисенко І.П. Ефективність комбінованих систем пилогазоочищення: науковий звіт Інституту технічної теплофізики НАН України. – Київ, 2023. – 160 с.

65. Офіційний сайт Промислове обладнання України. Системи пилогазоочищення для промисловості. URL: <https://promvent.com.ua/gazoochistka>

66. Офіційний сайт УкрВентСистеми. Обладнання для очищення промислових газів. – URL: <https://ukrvent.com.ua/catalog/filtr-gazoochystka>

67. Офіційний сайт АрселорМіттал Кривий Ріг. Виробництво коксу. URL: <https://ukraine.arcelormittal.com/production-sytle/coke-production>

68. Офіційний сайт Systemax. Універсальні циклони ЦН-11. URL: <https://systemax.ua/ciklony/cikloni-universalnie/cn-11>

69. Офіційний сайт ВЕНТ-ФІЛЬТР. Рукавні фільтри для аспіраційних систем. URL: <https://ventfilter.kiev.ua/goods/filtr-rukavniy>

70. Офіційний сайт Ультрафільтр. Виробництво рукавних фільтрів в Україні. URL: <https://ultrafilter.com.ua/catalog/filtry-promyshlennoy-aspiratsii/proizvodstvo-rukavnykh-filtrov-ukraina>

71. Офіційний сайт Вент-Заводи. Електрофільтри для промислових підприємств. URL: <https://7-vz.com/ua/category/elektrofiltry>

72. Офіційний сайт Бердичівський машинобудівний завод "Прогрес". Електрофільтри для очищення газів URL: <https://bmzprogress.com/catalog/pilo-gazo-siroochishchennya/electrostatic-precipitators/electrostatic-precipitators>

73. Офіційний сайт BTS Engineering. Скрубер мокрого очищення BTS-V-2100 URL: <https://bts.com.ua/product-category/skruberi/>

74. Офіційний сайт Prom-nasos. Скрубер мокрого очищення BTS-V-2100 URL: <https://prom-nasos.com.ua/skruberi>

75. Офіційний сайт АрселорМіттал Кривий Ріг. Програма екологічної модернізації. URL: <https://ukraine.arcelormittal.com/corporate-responsibility/environment>

76. Офіційний сайт ПАТ «Запоріжсталь». Оновлення систем очищення викидів. URL: <https://zaporizhstal.com/modernization>

77. Офіційний сайт ДТЕК Трипільська ТЕС. Енергоефективні технології очищення викидів. URL: <https://dtek.com/energy-cleaning>

78. Офіційний сайт ТОВ «Агро-Лідер». Інноваційні рішення в аспіраційних системах. URL: <https://agro-leader.com/ventilation-systems>

79. Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського». Оптимізація споживання електроенергії в системах очищення промислових газів. URL: <https://kpi.ua/energy-optimization>

80. Український науково-дослідний інститут екологічних проблем. Аналіз енергоефективності комбінованих систем очищення промислових газів. УкрНДІЕП. URL: <https://ecology-institute.ua/research/energy-saving>

81. Офіційний сайт Верховна Рада України. Закон України "Про охорону праці". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>

82. Офіційний сайт Верховна Рада України. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/322-08>

83. Офіційний сайт Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості». ДСТУ EN 689:2018 «Оцінка впливу хімічних речовин на робочому місці». – URL: <https://uas.org.ua/ua/services/standartizatsiya/natsionalni-standarty/>

84. Офіційний сайт Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості». ДСТУ 7238:2011 «Безпека праці. Атестація

робочих місць». – URL:  
<https://uas.org.ua/ua/services/standartizatsiya/natsionalni-standarty/>

85. Офіційний сайт Верховна Рада України. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 1 липня 1999 року № 246 «Про затвердження Державних санітарних правил ДСП 201-97». URL:  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0421-99>

86. Програма заходів з охорони праці та промислової безпеки на підприємстві ТОВ «Метиз»: внутрішній документ підприємства. – Кам'янське, 2015. – 34 с.

87. План облаштування та експлуатації бомбосховища на підприємстві ТОВ «Метиз»: внутрішній документ підприємства. – Кам'янське, 2025. – 18 с.

88. Ратушняк Г. С., Степанковський Р. В. Регулювання витрати аеродинамічних потоків в системах вентиляції та аспірації. Вінниця: ВНТУ, 2015. 112 с.

89. Енергозбереження в системах вентиляції і кондиціонування повітря. Patriot-NRG. – URL: <https://patriot-nrg.com/uk/content/energozberezhennya-v-systemah-ventylyaciyi-i-kondyciyuvannya-povitrya>