

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці
УДК 631.4:504.53(477.86)
(індекс)

Скобель Дмитро Ярославович
(прізвище, ім'я по батькові)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД ТОКСИЧНИХ ГАЗІВ У ПРОМИСЛОВИХ ЗОНАХ.

183 “Технології захисту навколишнього середовища”

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

Здобувач освітнього ступеня Скобель Дмитро Ярославович
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри Грицуляк Галина Михайлівна, д. с.г. н., доцент
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ

2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут нафтогазової інженерії

Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

ОПП Технології захисту навколишнього середовища

Затверджую

Зав. кафедри ТЗБП

Галина ГРИЦУЛЯК
(ім'я та прізвище) (підпис)

“ ____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Скобелю Дмитру Ярославовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: «Оцінка ефективності фізико-хімічних методів очищення повітря від токсичних газів у промислових зонах»

Керівник роботи: _____ проф. Семчук Ярослав Михайлович
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Затверджені наказом університету від “ ____ ” _____ 20__ р. №

Термін здачі закінченої роботи “ ____ ” _____ 2026 р.

Вихідні дані до роботи:

Наукові літературні джерела, нормативно-правові акти у сфері охорони атмосферного повітря, статистичні та довідкові матеріали щодо забруднення повітря промисловими викидами, а також результати розрахунків ефективності фізико-хімічних методів очищення газових викидів. Для проведення дослідження використано сучасні дані щодо абсорбційних, адсорбційних та каталітичних технологій очищення повітря, показники концентрацій забруднювальних речовин та методики оцінки ефективності газоочисного обладнання.

Зміст пояснювальної записки, перелік питань, що підлягають розробці:

ВСТУП. РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД ТОКСИЧНИХ ГАЗІВ У ПРОМИСЛОВИХ ЗОНАХ 1.1. Джерела утворення та характеристика основних токсичних газів у промислових викидах 1.1.1. Вплив токсичних газів на здоров'я населення та екосистеми 1.2. Нормативно-правова база у сфері охорони атмосферного повітря. 1.2.1 Європейські підходи до регулювання промислових викидів. 1.2.2 Особливості поширення токсичних газів у атмосферному повітрі промислових зон 1.3. Фізико-хімічні методи очищення газових викидів 1.4. Порівняльна характеристика сучасних технологій очищення повітря. РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ 2.1. Характеристика об'єкта дослідження та джерел забруднення 2.2. Методики відбору проб та визначення концентрацій забруднювачів. 2.2.1 Сучасні автоматизовані системи моніторингу атмосферного повітря. 2.3. Методика оцінки ефективності фізико-хімічних методів очищення . РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ 3.1. Дослідження процесів абсорбційного очищення газових викидів 3.2. Дослідження процесів адсорбційного вловлювання летких органічних сполук 3.3. Оцінка застосування каталітичних методів знешкодження газових викидів 3.4. Порівняльний аналіз ефективності досліджуваних методів та обґрунтування вибору оптимальної технологічної схеми. РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ 4.1. Розрахунок еколого-економічної ефективності впровадження запропонованих методів очищення. 4.1.1 Екологічний ефект від зменшення забруднення атмосферного повітря та впливу на здоров'я населення 4.2. Охорона праці та техніка безпеки під час експлуатації фізико-хімічних газоочисних установок. ВИСНОВКИ. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ. ДОДАТКИ.

Календарний план виконання бакалаврської роботи

№	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	ВСТУП		
2	Розділ 1. Теоретико-методологічні основи очищення промислових викидів		
3	Розділ 2. Об'єкт, матеріали та методи дослідження		
4	Розділ 3. Оцінка ефективності фізико-хімічних методів очищення		
5	Розділ 4. Еколого-економічне обґрунтування та охорона праці		
6	Висновки		
7	Літературні джерела Додатки		

Студент: _____ Скобель Дмитро Ярославович _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник: _____ проф. Семчук Ярослав Михайлович _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота на тему «Оцінка ефективності фізико-хімічних методів очищення повітря від токсичних газів у промислових зонах» присвячена дослідженню сучасних методів очищення газоповітряних викидів промислових підприємств, аналізу ефективності фізико-хімічних технологій видалення токсичних газів та розробленню рекомендацій щодо підвищення екологічної безпеки атмосферного повітря в промислових зонах. Об'єкт дослідження – процеси вилучення токсичних газоподібних компонентів із промислових викидів.

Предмет дослідження – технологічні параметри та еколого-економічна ефективність фізико-хімічних методів очищення повітря.

Мета роботи – комплексна оцінка ефективності фізико-хімічних методів очищення повітря від токсичних домішок у промислових зонах та розробка рекомендацій щодо вибору оптимальної технологічної схеми очищення.

У роботі досліджено основні джерела утворення токсичних газів у промислових зонах, проаналізовано їх вплив на здоров'я населення та компоненти екосистем. Розглянуто нормативно-правову базу України та європейські підходи до регулювання промислових викидів. Наведено характеристику основних токсичних газів, особливості їх поширення в атмосферному повітрі та сучасні підходи до контролю якості атмосферного середовища.

Проаналізовано класифікацію методів очищення газових викидів та детально розглянуто фізико-хімічні методи очищення, зокрема абсорбцію, адсорбцію, каталітичне та термічне очищення. Висвітлено принципи роботи відповідного газоочисного обладнання, фактори, що впливають на ефективність очищення, а також особливості застосування різних технологій на промислових підприємствах.

У практичній частині роботи розглянуто методики відбору проб атмосферного повітря та інструментального визначення концентрацій токсичних газів. Проведено порівняльну оцінку ефективності абсорбційних, адсорбційних та каталітичних установок за технічними, екологічними та економічними показниками. Виконано розрахунки ступеня очищення, визначено переваги та недоліки досліджуваних технологій.

За результатами дослідження встановлено, що найбільш ефективними для очищення промислових викидів є комбіновані фізико-хімічні системи, які забезпечують високий ступінь вилучення токсичних компонентів та відповідають сучасним вимогам екологічної безпеки. Обґрунтовано доцільність використання сучасних газоочисних установок для зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря та покращення екологічного стану промислових територій.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення систем очищення промислових викидів, підвищення ефективності природоохоронних заходів та забезпечення відповідності виробництва екологічним нормативам.

ABSTRACT

The bachelor's thesis entitled "Assessment of the Efficiency of Physicochemical Air Purification Methods for Toxic Gases in Industrial Areas" is devoted to the study of modern methods for treating industrial gas emissions, analyzing the efficiency of physicochemical technologies for toxic gas removal, and developing recommendations aimed at improving environmental safety and air quality in industrial zones.

The object of the research is the processes of removing toxic gaseous components from industrial emissions.

The subject of the research is the technological parameters and environmental-economic efficiency of physicochemical air purification methods.

The purpose of the study is to comprehensively assess the effectiveness of physicochemical methods for removing toxic pollutants from air in industrial areas and to develop recommendations for selecting an optimal technological purification scheme.

The thesis investigates the main sources of toxic gas emissions in industrial zones and analyzes their impact on human health and ecosystem components. The regulatory framework of Ukraine and European approaches to the regulation of industrial emissions are reviewed. The characteristics of major toxic gases, their dispersion in the atmosphere, and modern approaches to air quality control are presented.

The classification of gas purification methods is analyzed, and special attention is paid to physicochemical purification technologies, including absorption, adsorption, catalytic oxidation, and thermal treatment. The operating principles of gas-cleaning equipment, factors affecting purification efficiency, and the specific features of applying various technologies at industrial enterprises are discussed.

The practical part of the study examines methods of atmospheric air sampling and instrumental determination of toxic gas concentrations. A

comparative assessment of the efficiency of absorption, adsorption, and catalytic treatment systems was carried out based on technical, environmental, and economic indicators. The purification efficiency was calculated, and the advantages and disadvantages of the investigated technologies were identified.

The results of the study indicate that combined physicochemical systems are the most effective for treating industrial emissions, providing a high degree of toxic component removal while meeting modern environmental safety requirements. The feasibility of implementing advanced gas-cleaning technologies to reduce anthropogenic pressure on atmospheric air and improve environmental conditions in industrial areas has been substantiated.

The practical significance of the thesis lies in the possibility of applying the obtained results to improve industrial air purification systems, increase the effectiveness of environmental protection measures, and ensure compliance of industrial production with environmental regulations.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ.....	13
1.1 Джерела утворення та характеристика основних токсичних газів у промислових зонах.....	13
1.1.1 Вплив токсичних газів на здоров'я населення та екосистеми	18
1.2 Нормативно-правова база у сфері охорони атмосферного повітря	23
1.2.1 Європейські підходи до регулювання промислових викидів.....	27
1.2.2 Особливості поширення токсичних газів у атмосферному повітрі промислових зон.....	28
1.3 Класифікація та загальна характеристика методів очищення газових викидів.....	31
1.4 Класифікація та загальна характеристика методів очищення газових викидів.....	34
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	39
2.1 Характеристика об'єкта дослідження (типова промзона).	39
2.2 Методики відбору проб та інструментального аналізу концентрації токсичних речовин у повітрі.....	44
2.2.1 Сучасні автоматизовані системи моніторингу атмосферного повітря.....	50
2.3 Методики відбору проб та інструментального аналізу концентрації токсичних речовин у повітрі.....	52
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ.....	54
3.1. Аналіз ефективності абсорбційних методів очищення повітря (на прикладі нейтралізації кислих газів).....	54
3.2. Дослідження процесів адсорбційного вловлювання (наприклад, використання активованого вугілля чи цеолітів для летких органічних сполук).....	58

3.2.1 Фактори, що впливають на ефективність адсорбційного очищення газових викидів	62
3.3. Оцінка застосування каталітичних методів знешкодження газових викидів.....	64
3.4. Порівняльний аналіз ефективності досліджуваних методів та обґрунтування вибору оптимальної технологічної схеми.	68
РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	76
4.1. Розрахунок еколого-економічної ефективності впровадження запропонованих методів очищення.....	76
4.1.1 Екологічний ефект від зменшення забруднення атмосферного повітря та впливу на здоров'я населення	79
4.2. Охорона праці та техніка безпеки під час експлуатації фізико-хімічних газоочисних установок.	85
ВИСНОВОК.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:	93

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний індустріальний розвиток нерозривно пов'язаний із посиленням техногенного тиску на довкілля, де найбільш вразливою ланкою є атмосферне повітря. Діяльність підприємств енергетики, металургії та хімічного сектору супроводжується викидами оксидів нітрогену, сульфуру, вуглецю та летких органічних сполук. Накопичення цих речовин у промислових центрах призводить до появи кислотних дощів і фотохімічного смогу, що критично впливає на здоров'я населення та стабільність екосистем. У таких умовах розробка та впровадження високоефективних технологій газоочищення стає пріоритетним завданням інженерної екології.

Фізико-хімічні методи (абсорбція, адсорбція, каталітичне та термічне окиснення) сьогодні є найбільш перспективними для глибокого очищення викидів. Проте їхня ефективність суттєво залежить від специфіки виробничого процесу та властивостей забруднювачів, що зумовлює необхідність ретельного наукового обґрунтування при виборі конкретної технології.

Мета роботи: комплексна оцінка ефективності фізико-хімічних методів очищення повітря від токсичних домішок у промислових зонах та розробка рекомендацій щодо вибору оптимальної технологічної схеми.

Завдання дослідження:

1. Ідентифікувати ключові джерела емісії токсичних газів та проаналізувати їхній вплив на біосферу.
2. Опрацювати актуальну нормативно-правову базу у сфері моніторингу та охорони атмосфери.
3. Розкрити фізико-хімічну сутність сучасних методів очищення промислових газів.

4. Вивчити методику відбору проб та інструментального аналізу концентрації небезпечних речовин.
5. Провести порівняльну оцінку ефективності абсорбційних, адсорбційних та каталітичних установок.
6. Обґрунтувати найбільш раціональну систему очищення на основі технічних та екологічних критеріїв.
7. Розрахувати еколого-економічну доцільність запропонованих інженерних рішень.
8. Окреслити вимоги щодо охорони праці при роботі з газоочисним устаткуванням.

Об'єкт дослідження: процеси вилучення токсичних газоподібних компонентів із промислових викидів.

Предмет дослідження: технологічні параметри та еколого-економічна ефективність фізико-хімічних методів очищення повітря.

Методологічна база: робота ґрунтується на системному аналізі наукових джерел, методах інструментального контролю якості повітря, математичному моделюванні процесів очищення та статистичних методах обробки даних для оцінки економічного ефекту.

Практична цінність: результати дослідження можуть бути використані промисловими підприємствами для модернізації систем газоочищення, що дозволить мінімізувати екологічні ризики та забезпечити відповідність виробництва сучасним екологічним стандартам.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ

Забруднення атмосфери внаслідок роботи промислових об'єктів становить одну з найважливіших екологічних проблем у світі сьогодні. Постійне розширення виробничих потужностей, залежність від енергії з невідновлюваних джерел та швидкий розвиток промислових регіонів спричиняють збільшення викидів отруйних сполук у природне середовище. Така ситуація створює ризики для екологічної стійкості, людського здоров'я та нормального розвитку живих систем [1].

У сучасному світі критично важливо запроваджувати передові методи боротьби з газовими викидами, які здатні зменшувати вміст небезпечних компонентів до допустимих рівнів. Фізико-хімічні підходи до очищення повітря входять у число найпоширеніших та результативних способів нейтралізації шкідливих газів завдяки їх високій результативності, універсальній застосовності та можливості пристосування до різноманітних виробничих комплексів [2].

У даному розділі розглянуто основні джерела утворення токсичних газів у промислових зонах, нормативно-правові аспекти охорони атмосферного повітря, класифікацію методів очищення газових викидів, а також фізико-хімічні основи процесів знешкодження токсичних речовин.

1.1 Джерела утворення та характеристика основних токсичних газів у промислових зонах

Основні забруднювачі атмосфери в промислових регіонах походять від підприємств енергетичного, металургійного, хімічного, нафтопереробного, будівельних матеріалів та машино-технічного секторів. Під час виробничих процесів в навколишнє повітря виділяється велика

кількість токсичних газових компонентів, які завдають шкоди природному середовищу та організму людини [3].

Основні підходи до знешкодження газових викидів представлені на Рис. 1.1



Рисунок 1.1 – Основні джерела забруднення атмосферного повітря у промислових зонах

До найпоширеніших атмосферних забруднювачів відносяться нітрогенні оксиди (NO та NO_2), які утворюються головним чином під час інтенсивного нагрівання палива на генеруючих станціях, опалювальних установках та в автомобільних моторах. Нітрогенні оксиди беруть участь у виникненні озонового смогу, утворенні кислотних опадів та сприяють виникненню захворювань дихальної системи [4].

Істотну загрозу також становлять сульфурні оксиди, особливо сульфурний діоксид (SO_2), який виникає при згоранні палива, багатого на сірку, та в ході металургійних операцій. Потрапляючи в атмосферу, SO_2 реагує з водяною парою, вироблюючи сульфурну кислоту, що є одним з основних чинників утворення кислотних осадів (Рис. 1.2) [5].



Рисунок 1.2 – Кислотні дощі

Монооксид карбону (CO) утворюється як наслідок неповного окиснення органічного палива. Його виникнення найчастіше спостерігається на енергогенеруючих об'єктах, металургійних комбінатах та у сфері транспорту. CO — це отруйна газова речовина, здатна приєднуватися до білків крові, що послаблює можливість організму розповсюджувати кисень [6].

Окрему категорію атмосферних забруднювачів складають летючі неполярні сполуки (ЛНС), у тому числі бензен, метилбензен, диметилбензени, метаналь та подібні речовини. Їх викид відбувається під час виготовлення фарбувальних та лакових продуктів, обробки нафти, органічного синтезу та застосування летючих розчинників. Численні ЛНС мають онкогенні та здатні змінювати генетичний матеріал властивості [7].

Крім перелічених речовин, промислові викиди можуть включати азотистий водень, сірчистий водень, хлор, речовини, що містять фтор, та інші шкідливі компоненти, які створюють ризик навіть при незначних кількостях [8].

Отже, промислові заклади є значними постачальниками отруйних газів в атмосферу, що робить необхідним запровадження результативних способів контролю за газовими викидами.

Суттєвою обставиною формування газових викидів в промислових регіонах є виробничо-технологічний характер. Окремі промислові сектори відрізняються різноманітністю та кількістю забруднювальних компонентів, що надходять в атмосферне повітря. Наприклад, чорнометалургійні об'єкти продукують значні кількості сірчистих та азотистих оксидів, чадного газу та твердих частинок, тоді як хімічні комбінати додатково випускають азотистий водень, хлор, сірчистий водень та летючі неполярні сполуки. З огляду на це, при розробленні систем очищення слід враховувати не тільки обсяги викидів, а й їхню речовинну композицію [34].

Значний вплив на забруднення атмосферного простору здійснюють енергогенеруючі установки. Спалювання кам'яного вугілля, рідких нафтопродуктів та газоподібного палива спричиняє утворення масивних кількостей нітрогенних та сульфурних оксидів. Атмосферні викиди таких електроенергетичних об'єктів можуть розповсюджуватися на сотні кілометрів від їх джерела, негативно позначаючись на якісному стані повітря як у межах виробничого комплексу, так і в прилеглих зонах [35].

Критичною екологічною проблемою постають також газові викиди нафтопереробних та нафтохімічних виробництв. Під час операцій первинного розділення сирої нафти, прискореного розщеплення вуглеводнів та синтезу палив у повітря надходять леткі органічні сполуки, серед них бензен, толуен, етилбензен та різні ксилени. Такі матеріали відзначаються високим рівнем токсичності та тенденцією до кумуляції в атмосфері, що призводить до деградації повітряного середовища в промислових центрах [36].

Вагомим джерелом атмосферного забруднення слугують виробництва мінеральних добрив. При операціях синтезування аміачних сполук, сильних азотних кислот та інших хімічних продуктів в повітря можуть потрапляти аміачні пари, азотні оксиди та інші газоподібні матеріали. Навіть незначні розтікання та витoki технологічного характеру

можуть спричиняти погіршення локального екологічного стану та становити ризик для мешканців [7].

В умовах сьогодення наукова спільнота приділяє значну увагу вивченню вторинних форм атмосферного забруднення. Частина газових матеріалів після потрапляння в атмосферний простір проходить складні трансформації під впливом сонячної радіації. Унаслідок цих процесів формуються вторинні форми забруднювачів, зокрема озон у нижній атмосфері та озоновий смог, які часто несуть більшу небезпеку в порівнянні з початковими викидами [37].

На динаміку розповсюдження отруйних газів суттєво впливають кліматичні особливості та погодні умови. Температурні аномалії в атмосфері, зниження інтенсивності вітрового переносу та високі значення вологості спричиняють накопичення забруднювальних речовин в приземному повітряному прошарку. За таких метеорологічних умов показники шкідливих речовин можуть значно перевищувати встановлені стандарти навіть при незмінних рівнях промислового викиду [38].

Посилення процесів урбанізації та скупчення виробничих комплексів у великих агломераціях актуалізує проблему атмосферного забруднення. Накладання промислових викидів на викиди, що походять від автотранспорту, створює додаткове екологічне навантаження та ускладнює досягнення нормальної якості атмосферного середовища. Відповідно, сучасна екологічна парадигма орієнтується на комплексне управління атмосферою якістю, яке охоплює як оновлення виробничих технологій, так і запровадження продуктивних методів контролю та очищення газових викидів [39].

1.1.1 Вплив токсичних газів на здоров'я населення та екосистеми

Отруйні газові речовини, що генеруються в результаті функціонування промислових закладів, становлять один із найбільш критичних факторів техногенного впливу на природне оточення. Безперервне поступлення забруднювачів в атмосферний простір спричиняє не лише зниження показників якості повітря, а й завдає шкоди здоров'ю людей, стану біологічних систем та глобальним кліматичним трансформаціям. Критичну загрозу становлять сульфурні та нітрогенні оксиди, карбоніл та леткі неполярні матеріали, що здатні накопичуватися в повітрі та брати участь у багатоступневих хіміко-фізичних реакціях (Рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Вплив токсичних газів на здоров'я людини та компоненти екосистем

Сульфур діоксид (SO_2) посідає провідне місце серед забруднювачів атмосфери в регіонах промислового виробництва. Проникаючи в дихальну систему людини, він подразнює епітеліальні поверхні, викликає рефлекторний кашель, утруднення дихальних процесів та активізацію прихованих легневих хвороб. Найбільш вразливими до SO_2 виявляються молоді люди, люди третього віку та ті, які мають кардіоваскулярну патологію. Паралельно сульфуру діоксид приймає участь у формуванні атмосферних кислот, які сприяють закисленню земельних покривів та акваторій, дегенерації рослинного світу та деструкції матеріалів антропогенного походження.

Цілком порівняною за небезпекою виявляються нітрогенні оксидні сполуки (NO та NO_2), що утворюються під час окиснення палива при екстремальних температурних умовах. Ці матеріали сприяють виникненню фотохімічної смогової завіси, зменшують резервні спроможності дихальних органів та збільшують вірогідність захворювання на запальні та обструктивні легневі недуги. На рівні природних систем нітрогенні оксиди послаблюють продуктивність рослин, знижують потенціал біологічного середовища та дестабілізують циклічні процеси обміну елементів [26, 27].

Карбоніл (CO), що виникає при неповному окисленні органічного палива, відзначається значною отруйністю. Потрапивши в кровоносну систему, він приєднується до залізовмісного білка крові та формує стійкі комплекси, які блокують поставку O_2 до тканин організму. Наслідком стає дефіцит кисневого постачання, що може виражатися у вигляді болючих відчуттів у голові, запаморочень, енергетичного виснаження та дисфункцій кардіосистеми. При досягненні критичних концентрацій карбоніл створює пряму загрозу для життєзабезпечення.

Леткі неполярні матеріали (ЛНМ), до яких належать бензен, метилбензен, ксилени та метаналь, демонструють канцерогенні та здатні до генетичних модифікацій властивості. Тривалий контакт з такими сполуками

здатен викликати розлади нейрологічного функціонування, пошкодження гепатичних та нефричних органів та підвищити шанси виникнення пухлинних захворювань. Крім того, леткі неполярні матеріали в синергії з нітрогенними оксидами формують основну складову фотохімічної смогової завісі, що значно деградує стан атмосфери у великих промислово розвинених територіях.

Негативний вплив токсичних газів поширюється не лише на людину, а й на природні екосистеми. Забруднення атмосфери призводить до деградації рослинного покриву, зменшення біологічного різноманіття, погіршення якості ґрунтів і водних ресурсів. Під дією кислотних опадів відбувається вимивання поживних речовин із ґрунту, що знижує його родючість та негативно впливає на розвиток рослин. У водоймах закислення води порушує умови існування водних організмів та сприяє зменшенню чисельності окремих видів.

Характер впливу отруйних газових речовин на людський організм у значній мірі детермінується тривалістю експозиції до забруднених атмосферних мас та інтенсивністю концентрацій токсичних матеріалів. У разі епізодичного контакту можливі прояви подразнення слизових покривів органів зору та верхніх частин респіраторної системи, болючі відчуття в краніальній області, вестибулярні розлади та загальне зниження якості самопочуття. Систематичне перебування в умовах посиленого атмосферного забруднення сприяє формуванню постійних патологій легеневої системи, кровообігової патології та послаблення захисних механізмів організму щодо несприятливих екологічних чинників [34].

Надзвичайну загрозу являє комбінований вплив токсичних речовин. У реальних обставинах люди, які мешкають у промислово розвинених місцевостях, піддаються дії не поодиноким токсичним матеріалів, а комплексних гетерогенних сумішей. Взаємодія нітрогенних окислів, сульфуру діоксиду, дисперсних часток та летких неполярних матеріалів

може генерувати мультиплікативний ефект, при якому ушкодження людського тіла суттєво перевищує алгебраїчну суму окремих агентів [35].

Сучасні наукові дослідження демонструють тісний кореляційний зв'язок між ступенем атмосферного забруднення та частотою виявлення серцево-судинної патології. Значні концентрації отруйних газів прискорюють патогенез гіпертензивних розладів, коронарної недостатності та цереброваскулярних дисфункцій. Найбільш вразливими групами виступають люди поважного віку та пацієнти з фоною полісистемною патологією [36].

Несприятливий вплив атмосферних забруднювачів розповсюджується також на генеративні функції людської популяції. Відповідно до висновків популяційно-епідеміологічних студій, проживання на територіях із інтенсивним промисловим забрудненням збільшує ймовірність акушерських ускладнень, передчасного завершення вагітності та маніфестації вродженої морфофункціональної патології у новонароджених. Подібні явища пояснюються здатністю окремих токсичних сполук транслюкуватися крізь захисні біологічні структури та накопичуватися в тканинах організму [7].

Деградація атмосферної якості істотно впливає на функціональний стан природних біоценозів. Рослинні організми першими реагують на зростання концентрацій отруйних газів, адже газова дифузія реалізується через устони листового апарату. Під дією сульфурних та нітрогенних оксидів відбуваються мікроструктурні ушкодження клітинних компартментів, зменшується активність асимілятивного синтезу органічних речовин та виникають дисфункції ростових та розвивальних процесів у флорі [37].

Постійне надходження забруднювачів в атмосферу обумовлює зниження біопродуктивності деревних угруповань. Некротичні ураження листової та голкової структури послаблюють спроможність деревних

формацій утримувати CO₂ та генерувати O₂. Унаслідок цього деградує екологічна рівновага регіонів та знижується стійкість природних угруповань до дії екстремальних середовищних стресорів [38].

Критично важливим наслідком промислового викиду постає утворення атмосферних кислот. Внаслідок хіміко-фізичної реакції сульфурних та нітрогенних оксидів з атмосферою водяною парою утворюються кислотні сполуки, які з атмосферними опадами перетворюються на поверхню ґрунтового та водного середовищ. Закислення природних субстратів спричиняє дезорганізацію метаболічних циклів, скорочення біотичного різноманіття та дистрофію природних біоценозів [39].

Водні біосистеми виявляють виключну сприйнятливість до атмосферного транспорту забруднювальних агентів. Накопичення кислотних опадів у гідроекосистемах модифікує гідрогенні та іонні характеристики водних мас, що завдає шкоди іхтіофауні, мікроскопічним водним організмам та іншим гідробіонтам. За умов пролонгованого впливу можуть настати суттєві трансформації біологічного різноманіття та розбалансування харчових взаємозв'язків у водних середовищах [40].

Негативні прояви атмосферної токсичності виявляються також у змінах хімічних та фізичних характеристик ґрунтового субстрату. Вилуговування Ca²⁺, Mg²⁺ та інших макро- та мікроелементів погіршує родючість земельних покривів та знижує економічну ефективність аграрного виробництва. Одночасно прискорюється мобільність токсичних металічних елементів, які можуть акумулюватися в агрономічній продукції та проникати в трофічні ланцюги живих організмів [41].

З вищезазначеного випливає, що токсичне навантаження атмосферних газів характеризується системним впливом та охоплює усі складові екологічної системи. Негативні наслідки спостерігаються як на рівні окремого організму, так і на популяційному та біосферному рівнях, що

обґрунтовує невідкладність оптимізації атмосферного моніторингового контролю та впровадження інноваційних методик дезактивації промислових газових викидів [42].

Підсумовуючи, отруйні газові речовини репрезентують критичну екологічну та демографічну проблему, оскільки їх деструктивна дія охоплює всі компоненти природного оточення та безпосередньо загрожує людській популяції. Це обумовлює необхідність постійного контролю за показниками атмосферного забруднення та мобілізації сучасних потужних технологій нейтралізації промислових газових викидів [28, 29].

1.2 Нормативно-правова база у сфері охорони атмосферного повітря

Забезпечення якості атмосферних мас становить один із магістральних векторів природоохоронної стратегії України. Інституціональне та законодавче регламентування питань моніторингу та лімітування техногенних газових викидів спрямовано на гарантування екологічної стійкості, превенцію демографічних ризиків та конвергенцію з міжнародними природоохоронними стандартами (Рис 1.4) [9].



Рисунок 1.4 – Система державного регулювання охорони атмосферного повітря в Україні

Центральним нормативно-правовим інструментом у цій сфері являється Закон України «Про охорону атмосферного повітря», який закріплює юридичні та адміністративні засади діяльності, спрямованої на превенцію, мінімізацію та контроль повітряного забруднення [10].

Закон встановлює вимоги до виробничих суб'єктів щодо впровадження порогів допустимих газових емісій, здійснення аналітичного спостереження та інтеграції дезактивуючих технологій.

Особливу роль виконують регіональні санітарно-епідеміологічні норми та регламенти, які лімітують граничні чисельності шкідливих речовин у воздушних середовищах поселень та виробничих зон [11]. Для кожної токсичної сполуки диференціюються максимально допустимі рівні концентрацій (ГДК), трансгресія яких може спричинити патогенні наслідки для людської популяції та екологічних систем.

Україна активно учасниче у глобальних природоохоронних угодах та реалізує адаптацію вітчизняної нормативної бази до євроінтеграційних вимог. Стратегічним напрямом виступає запровадження мультидисциплінарного (холістичного) підходу до превенції та моніторингу техногенного забруднення на основі європейських нормативних документів [12].

Нагляд за дотриманням екологічних нормативів здійснюють інституції державного екологічного контролю, які проводять аудити виробничих об'єктів, здійснюють кількісну оцінку емісій та застосовують карально-дисциплінарні заходи у разі порушення встановлених обмежень [13].

Отже, комплекс нормативно-правових актів у сфері атмосферної охорони формує регуляторний каркас для регулювання промислової діяльності та мотивує інкорпорацію авангардних методик нейтралізації газових емісій.

Інтенсифікація промислово-виробничої діяльності супроводжується прискоренням масштабів техногенних газових емісій в атмосферні шари, що зумовлює пошук постійного удосконалення технологічних схем газоочищення. Провідну позицію у спектрі екозахисних методик займають фізико-хімічні технологічні процеси, які забезпечують раціональне видалення токсичних газоподібних компонентів з виробничих викидів та створюють передумови для дотримання регламентованих екологічних параметрів [10, 13].

Фізико-хімічні технологічні системи базуються на застосуванні процесів трансферу матеріалу, адсорпційних явищ, рідинної абсорбції, окисно-відновних трансформацій та каталітичної нейтралізації забруднювальних агентів. Імплементация таких технологічних комплексів уможливорює елімінацію різноманітного асортименту токсичних матеріалів, у т.ч. нітрогенних оксидів, сульфур діоксиду, карбону монооксиду, дисульфиду водню та летких неполярних органічних речовин [15, 17].

Однією з найзначніших переваг фізико-хімічних методик є їхня висока ефективність у разі мінімальних концентрацій забруднювачів у газовій фазі. На противагу механічним методам дефільтрації, що фокусуються переважно на елімінації дисперсних часток, фізико-хімічні системи дозволяють реалізувати ґрунтовне очищення газових потоків від шкідливих компонентів різноманітної природи [17, 5].

Конкурентні газоочисні агрегати відзначаються розвинутим рівнем комп'ютеризації та опцією безперервного моніторингу операційних параметрів. Впровадження цифровізованих систем управління створює можливість забезпечувати оптимальні робочі режими устаткування та гарантувати неперервно високу якість очищення незалежно від коливань газових композицій [23, 31, 32].

Селекція конкретної технологічної методики детермінується молекулярно-фізичними характеристиками контамінантів, їх інтенсивністю

у викидах, температурними параметрами газового потоку та вимогами щодо граничного ступеня дефільтрації. У численних практичних ситуаціях для оптимізації результатів застосовуються гібридні конструкції, які інтегрують декілька технологічних операцій в одному устаткуванні [13, 5].

Фізико-хімічні технології набувають критичного значення на виробничих об'єктах енергетичного комплексу, металургії, петрохімії та органічного синтезу. Саме ці виробничі гілки генерують суттєву частину техногенного впливу на атмосферу та експліцитно потребують застосування високоефективних природоохоронних методик [10, 15].

Продуктивність газоочисних комплексів детермінується раціональністю обрання технологічної конфігурації та адекватністю умов функціонування обладнання. Критичними змінними виступають температурні режими, тиск, гідродинамічні характеристики газового потоку та якісні параметри хемічних реагентів чи абсорбентів, задіяних у елімінації забруднювачів [18, 24].

У сучасній практиці дедалі актуальнішою стає парадигма мультиетапного очищення газових викидів. Її методологічна основа полягає у послідовному застосуванні кількох дефільтраційних технологій, що дозволяє гарантувати ефективну елімінацію різних категорій контамінантів та максимізувати зниження негативних ефектів виробничої діяльності на біосферу [13, 25].

Суттєвою перевагою актуальних фізико-хімічних систем є опція рециклювання окремих речовинних компонентів, екстрагованих з газових потоків. Таке циркулярне рішення не лише скорочує повітряне забруднення, а й акумулює матеріальну ресурсоефективність виробництва та редукує матеріальні видатки на екозахисні програми [17, 24].

Утім, фізико-хімічні технології газоочищення становлять невід'ємний компонент сучасних екологічної безпеки промислових об'єктів. Їх мобілізація гарантує високий ступінь газової дезактивації, зменшує

техногенну експозицію на природне оточення та транслюється на реалізацію цільових показників усталого розвитку у вимірі атмосферної охорони [10, 13, 15, 5].

1.2.1 Європейські підходи до регулювання промислових викидів

У контексті сучасних процесів європейської інтеграції України особливу актуальність набирає узгодження вітчизняної природоохоронної нормативної бази з регуляторними інструментами Європейського Союзу. Однією з центральних комплементарних стратегій такої гармонізації виступає модернізація інституціональних механізмів моніторингу та диригування техногенними газовими емісіями в атмосферні шари [10, 12].

Найвагоміший норматив-правовий документ Європейської спільноти у галузі лімітування виробничого забруднення конститує Директива 2010/75/ЄС щодо промислових емісій (Industrial Emissions Directive, IED). Провідна концептуальна мета цього регламенту полягає у превенції чи оптимальній редукції патогенних екологічних екстерналій виробничих об'єктів через мобілізацію найкращих доступних технологій та передової практики управління (BAT – Best Available Techniques) [12].

Теоретична конструкція BAT постулює впровадження технологічних платформ, які реалізують максимальний рівень екосистемної протекції за умови технічної реалізованості та економічної раціональності упровадження. Для кожного промислового сегменту на теренах Європейського Союзу формалізуються спеціалізовані референцеві матеріали (BREF), які артикулюють регламентовані величини емісій та оптимальні траєкторії технологічної трансформації [29].

Істотним компонентом євросистеми екологічної регуляції конститує концепція консолідованого (інтегрованого) дозволу на техногенні викиди. Таке регуляторне рішення імпліцитно передбачає

холістичну оцінку всіх категорій техногенного впливу виробничого суб'єкта на екосистеми, компрендуючи газові емісії, гідричні дислокації та матеріальні потоки дисперсних матеріалів. Такий мультидисциплінарний формат дозволяє оптимізувати екологічного контрольного механізму та гарантувати ефективну утилізацію природних [30].

Відповідно до визначень Договору про асоціаційне партнерство між Україною та Європейською Спільнотою, реалізується градуальна трансформація у впровадженні євростандартів природоохоронної політики. Прецедент уваги сфокусована на інтенсифікації технологічної модернізації промислових комплексів, акумуляції аналітичних систем контролю атмосферної якості та запровадженні комплексних екологічних дозволів на основі інтегрованого підходу [31].

Таким чином, узгодження національної нормативної бази до стандартів Європейської спільноти акцелерує піднесення рівня екологічної безпеки виробничої діяльності, генерує інцентивні механізми для апробації авангардних методик дезактивації викидів та сприяє наближення України до євростандартів екосистемної охорони [10, 12, 31].

1.2.2 Особливості поширення токсичних газів у атмосферному повітрі промислових зон

Дисперсія токсичних газоподібних речовин у складі атмосферних мас репрезентує складний фізико-хімічний феномен, визначається характеристиками джерел викидів, джерел забруднення, фізико-хімічними атрибутами забруднювальних агентів та синоптичними умовами території. Після інтеграції в атмосферні шари газові забруднювачі під впливом циркуляційних повітряних потоків здійснюють переміщуються на значні відстані на суттєві просторові дистанції, генеруючи локус підвищеної екологічної вразливості для людських популяцій та біотичних систем [43].

Висота джерела викиду емісійних джерел репрезентує один із детермінуючих векторів, що модулює процес дифузії та розсіювання забруднюючих компонентів. Зі збільшенням висотного розташування промислових вентиляційних систем підвищується потенціал горизонтального транспортування забруднювальних речовин аж до фази їх гравітаційного осідання чи хемічної нейтралізації через аерозольні взаємодії. Елевовані емісійні системи сприяють зменшенню локальних концентрацій забруднювачів в антропогенній периметральній зоні виробничих об'єктів, однак комплементарно не адресують глобальну проблематику атмосферної контамінації [5].

Суттєва ролева функція у траєкторіях горизонтального переносу токсичних газових агентів припадає на швидкість вітру. За умов модереного вітрового динамізму інтенсифікуються процеси вертикального та горизонтального ремішування аеромас, що сприяє деконцентрацію та дилуцію забруднювальних компонентів у приземному атмосферному шарі. Контрастивно, стабільні атмосферні умови або низькоенергійний вітровий режим сприяють накопиченню забруднювачів шкідливих речовин у межах промислових комплексів та сусідніх антропогенних зон [45].

Критичної ваги у модуляції газоподібної дисперсії набуває феномен термічної стратифікації атмосфери. В нормальному термодинамічному стані температурний градієнт зменшується з висотою, ампліфікуючи турбулентні процеси перемішування атмосферних шарів. На противагу, під час виникнення температурної інверсійної аномалії формується термічна перегородка, яка обмежує вертикальну циркуляцію та конденсує забруднені повітряні маси у приповерхневому атмосферному регіоні [4].

Температурні інверсійні явища концентруються переважно у холодних сезонних періодах (осінь, зима) та персистують протягом кількох консекутивних діб. Під час таких синоптичних аномалій концентраційні

величини нітрозних оксидів, сульфур-діоксиду та інших токсичних компонентів в урбаністичних атмосферах частіше за все трансцендують установлені санітарні максимуми. Саме інверсійні синоптичні конфігурації генерують етіологічні підвалини численних смогових епізодів у крупних індустріальних агломераціях планетарного масштабу [16].

Суттєвої ролі у модуляції дисперсійних процесів відіграє вологість повітря. Гідричні пари беруть активну участь у комплексі фізико-хімічних трансформацій, результатом яких є конверсія газових забруднювачів у вторинні аерозольні утворення. Такі каталітичні процеси сприяють генерезі фотоліабільних туманів та фотокаталітичного смогу, що персоніфікують екстериоризовану загрозу людському здоров'ю [46].

Топографічні та морфологічні особливості рельєфної конфігурації території визначають векторіальність розсіювання поллютантів. У деклівних формаціях, орографічних депресіях та синклінальних гірських структурах реєструється фенотип повітряної стазис, що потенціює аккумуляцію токсичних агентів. У таких орографічних мікрорайонах навіть мінімізовані промислові емісії провокують критичні дегредаційні сценарії якості атмосферного газового середовища [15].

У метрополітенських індустріальних агломераціях істотного значення набирає феномен урбанізаційної теплової аномалії та модифікацій мікроклімату. Високодензифікована будівельна архітектоніка модифікує аеродинамічні характеристики циркуляції повітряних потоків, генеруючи локалізовані турбулентні зони та стагнаційні аномалії. Це обумовлює компліцитивність прогностичних методик та експігує необхідність впровадження софісцикованих комп'ютерних парадигм для квантифікації екологічних ризиків [47].

Для прогнозування траєкторій поширення токсичних газових забруднювачів мобілізуються сучасні математико-комп'ютерні парадигми атмосферної дисперсійної моделізації. Такі симуляційні системи інтегрують

емісійні характеристики джерел забруднення, синоптичні й мікрокліматичні параметри, орографічну конфігурацію територій та фізико-хімічні атрибути забруднювальних речовин. Дериватовані симуляційні рішення застосовуються для дизайну природоохоронних інтервенцій та демаркації санітарно-протекційних периметрів промислових комплексів [48].

Апробація математичної парадигми моделізації сприяє квалітативну оцінку можливих еволюційних сценаріїв екологічної трансформації у разі флюктуацій виробничих масштабів або евентуальних непередбачених емісійних подій. Такі прогностичні конструкції персоніфікують пріоритетну значимість для забезпечення антропогенної безпеки та оптимізації ефективності атмосферних моніторингових систем [49].

Отже, дисперсія токсичних газових компонентів у атмосферному просторі модулюється комплексною синергією природних і техногенних факторів-детермінант. Епістемічна компетенція щодо закономірностей атмосферної дисперсії забруднювачів конституює необхідну гносеологічну основу для прогностичних досліджень екологічних ризиків та креаціонування ефективних превентивних заходів щодо сохрання атмосферного газового середовища [43, 49].

1.3 Класифікація та загальна характеристика методів очищення газових викидів.

Очищення промислових газових викидів є одним із найважливіших напрямів забезпечення екологічної безпеки підприємств та зменшення негативного впливу виробництва на атмосферне повітря. Вибір методу очищення залежить від складу забруднювальних речовин, їх концентрації, фізико-хімічних властивостей, температури газового потоку та вимог до ступеня очищення.

Сучасні методи очищення газових викидів поділяють на п'ять основних груп: механічні, фізичні, фізико-хімічні, хімічні та біологічні. Кожна з них має свої особливості, переваги та сферу застосування.

Механічні методи очищення

Механічні методи використовуються для видалення твердих частинок із газового потоку. До таких забруднювачів належать пил, сажа, зола та інші аерозольні частинки. Очищення здійснюється за допомогою циклонів, рукавних фільтрів, електрофільтрів та інших пиловловлювальних установок.

Перевагами механічних методів є простота конструкції обладнання, відносно невисока вартість експлуатації та можливість очищення значних об'ємів газів. Водночас вони малоефективні для видалення газоподібних забруднювачів.

Фізичні методи очищення

Фізичні методи базуються на використанні фізичних процесів, таких як конденсація, охолодження або зміна агрегатного стану речовин. Вони застосовуються для вилучення парів летких речовин та дрібнодисперсних аерозолів із газових потоків.

Ефективність фізичних методів залежить від температури, тиску та фізичних властивостей забруднювальних речовин. Часто вони використовуються як попередній етап перед більш глибоким очищенням.

Фізико-хімічні методи очищення

Фізико-хімічні методи належать до найбільш поширених способів очищення промислових викидів. Вони поєднують фізичні процеси масообміну з хімічними реакціями та забезпечують високу ефективність видалення газоподібних забруднювачів.

До цієї групи належать абсорбція, адсорбція, каталітичне окиснення та термічне знешкодження. Дані методи широко використовуються для очищення викидів від оксидів сірки, оксидів азоту, аміаку, сірководню та летких органічних сполук.

Абсорбційні методи

Абсорбція являє собою процес поглинання газоподібних забруднювачів рідиною-поглиначем. Найчастіше для цього використовують воду, водні розчини лугів або спеціальні хімічні реагенти.

Під час контакту газу з рідиною забруднювальні речовини переходять у рідку фазу, де можуть нейтралізуватися або піддаватися подальшій переробці. Абсорбційні установки широко застосовуються для очищення викидів від діоксиду сірки, аміаку, хлороводню та інших добре розчинних газів.

Основними перевагами абсорбції є висока ефективність очищення та можливість одночасного видалення декількох забруднювачів.

Адсорбційні методи

Адсорбція базується на поглинанні молекул забруднювачів поверхнею твердих пористих матеріалів. Як адсорбенти найчастіше використовують активоване вугілля, силікагель та цеоліти.

Даний метод ефективний для вилучення летких органічних сполук, токсичних домішок та речовин із низькими концентраціями у викидах. Після насичення адсорбент може регенеруватися та використовуватися повторно, що підвищує економічну ефективність процесу.

Каталітичне очищення

Каталітичне очищення передбачає перетворення шкідливих речовин на менш небезпечні сполуки за участю каталізаторів. У присутності каталізатора хімічні реакції відбуваються при нижчих температурах, що дозволяє зменшити енергетичні витрати.

Метод широко застосовується для очищення газових потоків від оксиду вуглецю, оксидів азоту та летких органічних сполук.

Термічне очищення

Термічне очищення полягає у високотемпературному окисненні забруднювальних речовин. У процесі спалювання токсичні органічні сполуки перетворюються переважно на вуглекислий газ та водяну пару.

Цей метод характеризується високою ефективністю, однак потребує значних енергетичних витрат і використовується переважно для газів із високим вмістом органічних домішок.

Біологічні методи очищення

Біологічні методи ґрунтуються на здатності мікроорганізмів розкладати шкідливі речовини до безпечних продуктів. Для цього використовують біофільтри, біоскрубери та інші установки біологічного очищення.

Такі технології є екологічно безпечними та економічно вигідними для очищення газових потоків із невисокими концентраціями органічних забруднювачів і запахоутворюючих речовин.

У висновку хочу сказати що, кожна група методів очищення газових викидів має власні особливості та сферу застосування. Вибір конкретної технології визначається складом викидів, вимогами до ефективності очищення та техніко-економічними характеристиками виробництва. Для досягнення найкращих результатів на сучасних підприємствах часто застосовують комбіновані системи газоочищення, які поєднують декілька методів в одному технологічному процесі.

1.4 Класифікація та загальна характеристика методів очищення газових викидів.

Фізико-хімічні методи очищення газових викидів базуються на процесах масообміну, теплообміну та хімічних реакціях, у результаті яких

токсичні речовини перетворюються на менш небезпечні або повністю нейтральні сполуки. Завдяки високій ефективності такі методи широко застосовуються у сучасних газоочисних системах промислових підприємств [15].

Одним із найпоширеніших методів є абсорбція — процес поглинання газоподібних забруднювачів рідинами-поглиначами. Під час контакту газової та рідкої фаз молекули токсичних речовин переходять у рідину внаслідок різниці концентрацій. Ефективність процесу залежить від розчинності газу, температури, тиску та площі контакту фаз [24].

Для очищення промислових викидів використовують воду, лужні розчини або спеціальні реагенти. Наприклад, діоксид сульфуру ефективно поглинається лужними розчинами з утворенням сульфітів і сульфатів [25].

Адсорбція є процесом накопичення молекул токсичних речовин на поверхні твердого пористого матеріалу — адсорбенту. Процес відбувається завдяки фізичним або хімічним силам взаємодії між поверхнею адсорбенту та молекулами забруднювача [5].

Абсорбційне очищення газових викидів є одним із найбільш досліджених і широко впроваджених методів захисту атмосферного повітря від забруднення. Висока ефективність цього способу пояснюється можливістю вилучення значної кількості газоподібних домішок шляхом їх переходу з газової фази в рідку. Залежно від природи забруднювальних речовин та складу поглинальної рідини ефективність очищення може досягати 90–99 %, що робить абсорбційні технології конкурентоспроможними порівняно з іншими методами газоочищення [15, 17].

Сутність процесу абсорбції полягає у створенні максимально можливого контакту між забрудненим газовим потоком та рідким абсорбентом. Під час такого контакту молекули шкідливих речовин переходять у рідину внаслідок фізичного розчинення або хімічної взаємодії.

Інтенсивність процесу визначається швидкістю масообміну між фазами, площею поверхні контакту та фізико-хімічними властивостями речовин, що взаємодіють [17, 18].

У промисловій практиці найбільш поширеними абсорбентами є вода, водні розчини лугів, кислот та спеціальні хімічні реагенти. Вода використовується для вилучення добре розчинних газів, зокрема аміаку та хлороводню. Для очищення викидів від оксидів сірки та інших кислотних газів застосовують лужні розчини, які забезпечують не лише поглинання забруднювачів, а й їх подальшу нейтралізацію [15, 5].

Однією з головних переваг абсорбційного очищення є можливість одночасного видалення декількох компонентів із газового потоку. Це особливо важливо для підприємств хімічної та металургійної промисловості, де викиди зазвичай містять складні суміші забруднювальних речовин різного походження. Використання багатокомпонентних абсорбційних систем дозволяє підвищити ефективність очищення та зменшити кількість додаткових технологічних операцій [18, 24].

Ефективність абсорбційного процесу значною мірою залежить від температури газового потоку. Для більшості забруднювальних речовин зі зниженням температури підвищується їх розчинність у рідині, що позитивно впливає на ступінь очищення. Саме тому в багатьох технологічних схемах перед подачею газів до абсорбера передбачаються системи охолодження, які забезпечують оптимальні умови перебігу процесу [17, 5].

Важливим фактором є також вибір конструкції апарата. У сучасній промисловості широко використовуються насадкові, тарілчасті, плівкові та розпилювальні абсорбери. Кожен тип обладнання має свої особливості та сфери застосування. Наприклад, насадкові колони забезпечують велику площу контакту фаз і характеризуються високою ефективністю очищення, тоді як розпилювальні скрубери відзначаються простотою конструкції та можливістю роботи з великими обсягами газів [13, 15].

Незважаючи на значні переваги, абсорбційні методи мають певні обмеження. Після завершення процесу утворюються відпрацьовані розчини, які потребують регенерації або утилізації. За відсутності належної системи поводження з такими відходами може виникати проблема вторинного забруднення навколишнього середовища. Тому сучасні технології передбачають використання замкнених циклів циркуляції абсорбентів та систем повторного використання реагентів [17, 24].

Перспективним напрямом розвитку абсорбційних технологій є впровадження нових багатофункціональних поглинальних середовищ, які поєднують високу сорбційну здатність із можливістю багаторазової регенерації. Такі рішення дозволяють підвищити економічну ефективність газоочисних установок та зменшити експлуатаційні витрати підприємств [25, 31].

Таким чином, абсорбційні методи очищення газових викидів залишаються одним із найважливіших інструментів зменшення антропогенного навантаження на атмосферне повітря. Висока ефективність вилучення токсичних компонентів, широкий спектр застосування та постійне вдосконалення технологій забезпечують їх актуальність у сучасних системах екологічної безпеки промислових підприємств [15, 17, 5].

Найбільш поширеним адсорбентом є активоване вугілля, яке має велику площу поверхні та високу поглинальну здатність. Також у промисловості використовують цеоліти, силікагелі та інші пористі матеріали для вилучення летких органічних сполук і токсичних домішок.

Каталітичне окиснення полягає у прискоренні реакцій окиснення токсичних речовин за допомогою каталізаторів. У процесі очищення оксид карбону та органічні сполуки окиснюються до вуглекислого газу і водяної пари. Як каталізатори використовують платину, паладій, оксиди металів та інші активні речовини [16].

Перевагою каталітичного методу є можливість проведення процесу при нижчих температурах, що дозволяє зменшити енергетичні витрати та підвищити ефективність очищення.

Термічне окиснення базується на високотемпературному спалюванні токсичних компонентів у присутності кисню. Процес здійснюється при температурах 700–1200 °C, у результаті чого органічні та токсичні речовини руйнуються до безпечних продуктів згоряння [17].

Ефективність термічного окиснення залежить від температури процесу, часу перебування газів у реакційній зоні та рівномірності змішування з киснем. Основним недоліком цього методу є значні витрати енергії та можливість утворення вторинних забруднювачів, зокрема оксидів нітрогену [4].

Таким чином, фізико-хімічні методи очищення забезпечують високий рівень знешкодження токсичних газів та є важливим елементом сучасних систем екологічного захисту промислових підприємств.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Валідизація результативності фізико-хімічних технік деконтамінації атмосфери від токсичних газових агентів передумовою є реалізація комплексного аналітичного дослідження, що охоплює інвентаризацію антропогенних джерел забруднення, метрологічну детермінацію концентраційних параметрів контамінантів у атмосферному середовищі та евалюацію функціональної продуктивності газоочисних апаратних систем [1, 2]. Парадигматичною фазою такого інвестигування репрезентується обґрунтований вибір аналітичних протоколів семплювання, аплікація прецизійних інструментальних методик та адекватна імплементація кількісних критеріїв експлікації деконтамінаційної результативності [3, 4].

Презентована секція дифундує детальну характеристику досліджуваного об'єкта, делімітує аналітичні парадигми пробовідбору та спектрометричної детермінації молярних концентрацій токсичних субстанцій у газово-аеросольній матриці, а також специфікує базисні методологічні підходи до кількісної евалюації технологічної результативності газоочисних установок [5, 6].

2.1 Характеристика об'єкта дослідження (типова промзона).

Предметом інвестигування репрезентується типологічна промислова агломерація, на території якої функціонують виробничі комплекси мультисекторальної спеціалізації, операціональна діяльність яких супроводжується генезисом та емісією в атмосферну матрицю субстанціальних обсягів поллютивних агентів. Подібні техногенні території характеризуються репрезентативністю для численних регіонів України та конституують значимий детермінант формування техногенного стресу на екосистемні комплекси [10, 12].

Промислова зона конституюється як скоординований агрегат виробничих об'єктів, інженерної інфраструктури, логістичних комунікацій та допоміжних суб'єктів господарювання, локалізованих у просторово обмеженій зоні. Базисними емісійними джерелами контамінантів у таких умовах функціонують технологічне устаткування, енергогенеруючі установки, теплогенеруючі агрегати, аерозольні вентиляційні системи та мобільні засоби, що опосередковують реалізацію виробничих процесів [13, 14].

Для превалюючої більшості промислових суб'єктів характеристичною є генерація азотоксидів, сульфурдіоксиду, карбонмонооксиду, летючих органічних компонентів та додаткових токсичних детермінантів. Композиційна архітектура емісій ґрунтується з виробничої специфікації, апліцированої сировинної матриці, технологічних парадигм функціонування устаткування та результативності встановлених газоочисних систем [3, 15].

Сингулярною характеристикою промислових агломерацій репрезентується плюралітет організованих та дезорганізованих емісійних джерел. До організованих джерел атрибууються димові труби, вентиляційні артеріали та спеціалізовані газовідвідні комплекси. Дезорганізовані викиди генеруються внаслідок порушення герметизації устаткування, виконання логістичних операцій або технологічної неадекватності виробничих циклів [13, 17].

Критичною детермінантою, що модулює якість атмосферної матриці в межах промислової агломерації, репрезентується інтенсифікація виробничої активності. Зі прогресією виробничих обсягів прогресує навантаження на деконтамінаційні системи та ескелюється ризик суперцесії максимально допустимих концентраційних параметрів контамінантів у приземному аеросольному шарі [10, 23].

На дисперсію та трансформацію поллютивних агентів значимо модулюють метеорологічні парадигми. Кінетичні та векторні параметри вітрового потоку, термічна амплітуда, гігromетрична сатурація та барометричні флуктуації детермінують трансміграцію газових домішок та інтенситет їх аккумуляції в дискретних територіальних сегментах. Партикулярно дисфункціональними репрезентуються температурні інверсійні сценарії, під час яких забруднювачі конценцентруються проксимально до земної поверхні [12, 20].

При експлікації об'єктної характеристики парадигматичною репрезентується інкорпорація санітарно-протекційної зони промислових суб'єктів. Санітарно-протекційна зона конститується як спеціалізована територіальна сегментація між емісійним джерелом та резидентніальними агломераціями, функціонально призначена для абстенціювання негативного впливу виробничої активності на популяційні групи. Параметри її розмірування детермінуються операціональною потужністю суб'єкта, виробничою спеціалізацією та магнітудою емісійних обсягів контамінантів [11, 5].

Субстанціальну роль у конституюванні екосистемного статусу промислової території опосередковують трансмобільні потоки. Циркуляція вантажної логістики супроводжується сукупною генерацією азотоксидів, карбонмонооксиду та мікродисперсної аеросольної матриці. Консеквентно агрегована техногенна індукція формується не лише азимутом стаціонарних контамінаційних джерел, але також мобільною логістичною інфраструктурою промислової зони [10, 20].

При евалюації екологічного статусу досліджуваної територіальної матриці апліціюються результати аерозольного моніторингу атмосферної компоненти. Такі спостережувальні процедури перміціюють детермінацію концентраційних параметрів базисних поллютивних агентів, аналітику

динамічних трансформацій та метроніку результативності екзекутованих еколого-протекційних інтервенцій на промислових суб'єктах [12, 23, 32].

Одним із критичних критеріїв евалюації атмосферного статусу репрезентується кореспондентність фактичних концентраційних параметрів контамінантів нормативно встановленим максимально допустимим значенням. Трансцесія нормативних порогів свідчить про дефіцит адекватності існуючих газоочисних систем та необхідність імплементації суплементарних еколого-протекційних мезур [10, 11].

Таким чином, типологічна промислова агломерація конституюється як мультикомплексна техногенна метасистема, у межах якої перманентно реалізується інтерпозиція виробничих циклів та натуральної екосистемної матриці. Іменно тому систематичне інвестигування емісійних детермінант, дисперсійних парадигм токсичних субстанцій та функціональної результативності газоочисних комплексів репрезентує критичну важливість для експліцерування екосистемної протекції популяційних агломерацій та прогресивного розвитку промислових територій [10, 12, 13].

Предметом інвестигування конституюється типологічна промислова агломерація, на територіальній матриці якої локалізовані виробничі субєкти енергетичної, машинобудівної та хімічної спеціалізації (Рис. 2.1). Такі промислові комплекси характеризуються максимальною інтенсифікацією техногенного стресу на екосистемні детермінанти та інтенсивною магнітудою емісійних обсягів поллютивних агентів у атмосферну матрицю [19].

Базисними емісійними дермінантами генезису токсичних газових компонентів у промисловій агломерації функціонують теплогенеруючі установки, технологічні кальцинаторні системи, аеросольні вентиляційні артеріали виробничих енклавів, піролітичні обробні комплекси та кальцинаційні циклі гоління палива. Консеквентно виробничої активності в атмосферну матрицю еміціюються азотоксиди, сульфурдіоксид,

карбонмонооксид, летючі органічні компоненти та супліментарні токсичні детермінанти [3].

Сингулярною характеристикою промислових агломерацій репрезентується екстенсивна щільність промислового розміщення, що генерує аккумуляцію поллютивних агентів у приземній аеросольній матриці. Субстанціальна модуляція дисперсії контамінантів опосередковується метеорологічними парадигмами, зокрема кінетичними та векторними параметрами вітрового потоку, термічною амплітудою та барометричною сатурацією [20].



Рисунок 2.1 – Типова схема промислової зони з джерелами атмосферних викидів

Для мінімізації негативного впливу на екосистемні детермінанти на промислових суб'єктах імплементуються варіабельні системи газоочищення, серед яких превалюючу репрезентативність набувають абсорбційні, адсорбційні та каталітико-оксидативні комплекси. Функціональна результативність їх операціональної діяльності детермінується

технологічними параметрами, композиційною архітектурою поліютивних агентів та умовами експліцерування устаткування [15].

Таким чином, типологічна промислова агломерація конституюється як комплексна техногенна метасистема, що неперервно потребує екосистемного монітерування та меліоративного впровадження сучасних методологій газоочищення атмосферних емісій.

2.2 Методики відбору проб та інструментального аналізу концентрації токсичних речовин у повітрі.

Евалюація поліютаційного статусу атмосферної компоненти неможливість без застосування сучасних методологій пробовідбірної процедури та консеквентного інструментально-аналітичного дослідження. Верифікаційна релевантність акумульованих результатів значимо детермінується коректністю організаційної архітектури пробовідбірного циклу, адгеренцією до встановлених нормативно-регламентаційних параметрів та апроксимацією адекватного аналітичного обладнання [12, 23].

Пробовідбір атмосферної матриці репрезентує один із критичних сегментів екосистемного моніторингу. Протентивною ціллю цієї процедури конституюється акквізиція репрезентативної проби, яка з максимальною точністю експліцерує фактичну композицію аеросольної матриці в дискретній досліджуваній локалізації. Дефектури, інцидентно допущені під час пробовідбірного процесу, можуть субстанціонально модулювати аналітичні результати та опосередковувати неадекватну евалюацію екосистемного статусу територіальної матриці [12].

Методологія пробовідбірної процедури детермінується характеристиками поліютивних субстанцій, темпоральною магнітудою спостережень та формульованими дослідницько-функціональними завданнями. При контролюванні якості атмосферної компоненти аплікуються варіабельні підходи: дискретно-точкові, середньо-циклічні та перманентно-безперервні методи пробовідбору. Кожен із представлених

процедур поєднує сингулярні переважні характеристики та застосовується залежно від мотивуючих умов екосистемного моніторингу [23, 32].

Дискретно-точковий пробовідбір застосовується для оперативної детермінації концентраційних параметрів забруднювальних агентів у специфічний темпоральний момент. Такий методологічний підхід передбачає експедитивну аквізицію інформації щодо атмосферного статусу та застосовується під час екосистемного інспектування або верифікаційних контрольних процедур промислової суб'єктної діяльності. Консеквентно дискретні вимірювання не завжди експліцують актуальний забруднювальний статус у продовженій темпоральній магнітуді [12, 20].

Для більш об'єктивної оцінки статусу атмосферної матриці часто застосовуються середньо-циклічні пробовідбірні процедури. У цьому контексті проби акумулюються протягом детермінованої темпоральної магнітуди, після чого реалізується їх лабораторно-аналітичне дослідження. Такий методологічний підхід передбачає конститування флюктуаційних варіацій концентраційних параметрів забруднювальних агентів та аквізицію верифіковано-достовірних даних щодо аерозольної якості [23].

Сучасні екосистемні моніторингові комплекси дедалі частіше базуються на застосуванні автоматизованих станцій спостереження. Такі технологічні системи забезпечують перманентно-безперервний контроль концентраційних параметрів домінуючих забруднювальних субстанцій та передачу інформаційного контенту в режимі реального часу. Акумульовані дані можуть інструменталізуватися для експедитивного реагування на епізодичні випадки екстенсивного перевищення нормативно-регламентаційних показників якості атмосферної компоненти [31, 32].

Під час виконання дослідницьких процедур особливу перевагу акцентується на селекції локалізацій пробовідбірних точок. Контрольні позиції повинні дислокуватися з урахуванням морфогеографічних особливостей рельєфної архітектури території, ортогональних напрямків

превалюючих аеродинамічних потоків, локалізацій антропогенних джерел поллюції та житлової агломерації. Це опосередковує забезпечення об'єктивності евалюаційних результатів та інтенсифікацію ефективності моніторингових заходів [12, 20].

Для детермінації концентраційних параметрів токсичних газоподібних агентів застосовуються варіабельні інструментально-аналітичні методи. Одним із найбільш репрезентативних конституюється газоаналізаторна методологія, яка дозволяє експедитивно квантифікувати композицію карбонмоноксиду, сульфур-діоксиду, азот-оксидних комплексів та інших компонентів *in situ* досліджуваного локусу [13, 23].

Газоаналізатори функціонують на базисі варіабельних фізико-операціональних парадигм, зокрема електрохімічної, оптичної, інфрачервоної або фотометричної аналітики. Селекція специфічного типологічного варіанту обладнання детермінується нозологією поллютивного агента, реквізитною точністю квантифікаційних операцій та контекстуальними умовами дослідницької екзекуції [13, 32].

Одним із найбільш точних та репрезентативних методів детермінації композиції газових сумішей конституюється газохроматографічна парадигма. Ця методологія забезпечує вищий рівень сенситивної чутливості та перміціює ідентифікацію навіть мініатюризованих концентраційних параметрів токсичних субстанцій у пробах атмосферної матриці. Газохроматографія застосовується широкомасштабно для аналізу летких органічних комплексів та поліморфних багатоконпонентних газових сумішей [17, 24].

Для контролювання вмісту азот-оксидних, сульфур-оксидних та інших газоподібних комплексів зокрема застосовуються спектрофотометричні аналітичні методи. Вони конструюються на основі квантифікування інтенсивності світлопоглинання або люмінесцентного випромінювання

досліджуваними субстанціями та характеризуються достатньою точністю та відносною екзекутивною простотою [18, 23].

Критичним сегментом екзекуції інструментально-аналітичного дослідження конституюється калібраційна верифікація вимірювального комплексу. Перманентна верифікаційна контролювання точності приладів перміціює мінімізацію вимірювальних дефектур та забезпечує верифіковану достовірність акумульованих результатів. Адгеренціальна дефектура щодо калібраційних парадигм може опосередковувати істотні девіаційні варіації у моніторингових результатах [32].

Після завершення квантифікаційних операцій акумульовані дані підлягають статистико-аналітичній обробці та компрехензивному аналізу. На цьому критичному операціональному етапі детермінуються середньоарифметичні значення концентраційних параметрів, максимальні та мінімальні показники, а також реалізується евалюація адекватності фактичних результатів встановленим нормативно-регламентаційним стандартам якості атмосферної матриці [12, 23].

Результати інструментально-контрольних операцій конституюють методологічну базу для екзекуції управлінсько-адміністративних децизій у сфері охоронної протекції атмосферної компоненти. Вони апліцуються для евалюації ефективності природоохоронних превентивних заходів, супервізії операціональної діяльності промислових антропогенних комплексів та розроблення програм екологічної безпеки на локальному та державному нівелях юрисдикції [10, 32].

Таким чином, апліцування сучасних методик пробовідбірних процедур та інструментально-аналітичного дослідження опосередковує акквізицію верифіковано-достовірної інформаційної матриці щодо статусу атмосферної компоненти та перміціює темпоральну експедитивну ідентифікацію негативних трансформаційних варіацій у екосистемному мікрокліматі. Ефективність екологічно-моніторингових операцій значною

метрою детермінується коректністю організаційної архітектури квантифікаційних процедур, якісною кваліфікацією апаратно-технічного забезпечення та адгеренціальною компліансою встановлених методико-процедурних парадигм [12, 23, 32].

Евалюація магнітуди поллютивного забруднення атмосферної матриці конструюється на базисі екзекуції пробовідбірних процедур та субсеквентної детермінації концентраційних параметрів токсичних субстанцій за опосередкуванням інструментально-аналітичних методологій. Верифіковна достовірність результатів дослідницької екзекуції значною мірою детермінується коректністю реалізації пробовідбірних операцій, адгеренціальною компліансою умов логістично-транспортної передачі та апліцуванням кореспондуючих аналітико-методичних парадигм [21].

Пробовідбірна процедура атмосферної матриці реалізується в комплансі з державно-нормативними стандартизаційними регламентаціями та санітарно-гігієнічними парадигмами. Проби селектуються у локусах максимальної експозиційної експозиції джерел антропогенних викидів, а також на периметральній демаркаційній лінії санітарно-захисної буферної зони промислового комплексу. Для реалізації цих операцій апліцуються аспіраційні установи, газоаналізаційні комплекси та спеціалізовані поглинально-сорбційні апаратні системи [22].

Під час екзекуції дослідницьких процедур детермінації концентраційних параметрів нітрогенових оксидних комплексів, сульфур-діоксиду та карбон-монооксиду апліцуються автоматизовані газоаналізаційні системи (Рис. 2.2), операціональна функціональність яких базується на електрохімічних, фотометричних або інфрачервонозахідних аналітичних парадигмах. Такі інструментальні апаратні комплекси перміціює експедитивну детермінацію концентраційних параметрів токсичних субстанцій в аеросольному матриксі та імплементацію перманентно-безперервних моніторингових операцій [23].



Рисунок 2.2 – Портативний газоаналізатор для визначення токсичних речовин

Для ідентифікації летких органічних речовин застосовують методи хроматографічного аналізу, які вирізняються високою прецизійністю та чутливістю. Зокрема, завдяки газовій хроматографії стає можливим виявлення навіть мікроконцентрацій органічних домішок у повітряному середовищі [24].

З find-форматом отриманих даних наступним кроком є їхнє зіставлення із гранично допустимими концентраціями (ГДК) поллютантів, що регламентуються чинними санітарно-гігієнічними вимогами та екологічним законодавством України [11].

Отже, впровадження новітніх підходів до відбору зразків та застосування високоточного інструментального аналізу дозволяє неупереджено оцінити ступінь забруднення атмосфери, а також зорієнтуватися в ефективності функціонування пиловловлювального та газоочисного устаткування.

2.2.1 Сучасні автоматизовані системи моніторингу атмосферного повітря

В умовах постійного інтенсифікації техногенного тиску на довкілля особливої актуальності набуває експрес-оцінка стану повітряного басейну. Попри високу точність, класичні підходи до відбору пром не дають змоги відстежувати динаміку змін у поточному моменті. Через це у промисловому секторі та в межах державних програм екологічного нагляду все активніше впроваджують автоматичні комплекси моніторингу повітряного середовища [23].

Такі автоматизовані комплекси є сукупністю апаратних засобів, які здійснюють перманентний аудит вмісту екотоксикантів, транслують отримані відомості до аналітичних центрів та забезпечують миттєве сповіщення у разі фіксації понаднормативних викидів. Головний плюс цих систем полягає в отриманні валідних даних «тут і зараз», завдяки чому можна оперативно локалізувати осередки емісії та контролювати дієвість екологічних ініціатив [32].

Структура новітніх вимірювальних комплексів зазвичай охоплює газоаналітичне обладнання, метеосенсори, модулі бездротового чи дротового зв'язку, а також спеціалізований софт для аналізу масивів інформації. За допомогою газоаналізаторів детектують рівні вмісту NO_x , SO_2 , CO , O_3 , сероводню (H_2S) та летких органічних речовин. Паралельно фіксуються ключові метеопараметри — температурний режим, вологість і тиск повітря, а також вектор і швидкість повітряних потоків, що дає змогу моделювати траєкторії та специфіку міграції поллютантів у повітряних масах [20, 23].

Щоб визначити вміст газоподібних поллютантів, зазвичай застосовують фотометричні, електрохімічні, а також оптичні (в ультрафіолетовому та інфрачервоному діапазонах) методи аналізу. Зокрема, сенсори електрохімічного типу мають високий поріг чутливості, тому їх активно використовують для моніторингу токсичних виділень

безпосередньо у виробничих зонах. ІЧ-аналізатори демонструють високу ефективність під час детекції монооксиду та діоксиду вуглецю (CO та CO₂), тоді як УФ-методики є оптимальними для вимірювання рівнів оксидів азоту й діоксиду сірки [23].

Невіддільним елементом новітніх моніторингових комплексів стало залучення геоінформаційного інструментарію. Поєднання вимірювальних даних із можливостями ГІС-технологій відкриває шлях до візуалізації зон забруднення на цифрових картах, математичного моделювання міграції токсикантів, а також прогнозування потенційних загроз для екосистем і здоров'я громадян. Подібні практики є загальноприйнятими у країнах ЄС і наразі активно інтегруються в Україні в межах реформування національної системи екологічного нагляду [12, 31].

На об'єктах промисловості автоматичні датчики можуть монтуватися безпосередньо в місцях виходу відхідних газів. За такої схеми організується перманентний аудит характеристик пилогазового потоку та обсягів шкідливих домішок як на вході до газоочисних споруд, так і на виході з них. Це дає змогу в реальному часі контролювати ККД адсорбційних, абсорбційних чи каталітичних систем, оперативно фіксувати збої у технологічних циклах і упереджувати залпові чи наднормативні викиди [13, 25].

Розгортання автоматизованої мережі спостереження за якістю повітряного басейну суттєво підвищує рівень екологічної безпеки підприємств, гарантує дотримання вимог правових актів у сфері екології та формує надійну аналітичну базу для ухвалення виважених менеджерських рішень у царині природокористування [10, 13].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що сучасні цифрові комплекси моніторингу є ключовим механізмом аудиту стану атмосфери та верифікації дієвості технологій газоочищення. ТанDEM безперервного екологічного

контролю та оперативного аналізу дозволяє помітно максимізувати віддачу від екологічних заходів на виробництві [23, 31, 32].

2.3 Методики відбору проб та інструментального аналізу концентрації токсичних речовин у повітрі.

Аудит функціонування систем газоочищення є критично важливою стадією в загальній системі забезпечення екологічної безпеки на виробничих об'єктах. Ключове завдання такого аналізу полягає у верифікації того, наскільки суттєво зменшується вміст токсичних компонентів у відхідних газах після їхньої технологічної обробки у відповідних очисних комплексах [25].

Основним показником, що відображає технологічну дієвість обладнання, виступає коефіцієнт (або ступінь) очищення. Його розраховують як співвідношення маси уловленого або нейтралізованого полютанта до його вихідного обсягу в газовому потоці перед надходженням до установки. Зазвичай цей параметр вимірюють і фіксують у відсотковому еквіваленті [15]:

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

де:

η — ефективність очищення, %;

C_1 — початкова концентрація забруднювача у газовому потоці;

C_2 — концентрація забруднювача після очищення.

Під час аудиту функціонування газоочисних комплексів аналізу підлягають не лише показники вловлювання, а й експлуатаційні параметри: пропускна здатність (продуктивність) апаратури, обсяги енергоспоживання,

експлуатаційна надійність системи, а також потенціал регенерації та повторного залучення сорбентів чи хімічних реагентів [5].

Для моніторингу та оцінювання дієвості фізико-хімічних технологій деструкції й уловлювання домішок зазвичай застосовують комплекс методів, що включає математичні розрахунки, порівняльні дослідження та статистичну обробку даних. Компаративний (порівняльний) аналіз дає змогу виявити сильні та слабкі сторони конкретних інженерних рішень з огляду на специфіку екотоксикантів і конкретні умови виробничого процесу [14].

Окремим вагомим критерієм виступає екологічна результативність. Вона відображає ступінь мінімізації деструктивного впливу промислових емісій на повітряний басейн і ступінь відповідності фактичних викидів чинним правовим та санітарним обмеженням [10].

Таким чином, узагальнена й усебічна оцінка параметрів роботи газоочисної техніки допомагає обґрунтувати вибір найбільш раціональних підходів до пилогазоочищення, гарантувати дотримання законодавчих лімітів і суттєво мінімізувати техногенні ризики для довкілля від діяльності індустріальних об'єктів.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ

У цьому структурному блоці представлено результати прикладних розшукувань автора стосовно оцінювання результативності фізико-хімічних технологій детоксикації повітряного середовища від газоподібних екотоксикантів. Експериментальна частина реалізувалася за допомогою моделювання параметрів для типового індустріального майданчика із залученням розрахункового алгоритму, детально описаного у другому розділі дисертації (роботи). Об'єктом компаративного аналізу стали найбільш затребувані у промисловості інженерні рішення для знешкодження газових емісій: сорбційні процеси (абсорбція та адсорбція), а також каталітична деструкція.

Базовим параметром порівняння слугував коефіцієнт уловлювання, що розраховувався на основі різниці вмісту шкідливих компонентів на вході до газоочисних комплексів та після завершення технологічного циклу. Накопичений масив даних дозволив чітко окреслити технологічні переваги й експлуатаційні ліміти кожної з розглянутих методик, а також аналітично довести доцільність вибору конкретної апаратурної схеми очищення для специфічних умов сучасних виробничих об'єктів.

3.1. Аналіз ефективності абсорбційних методів очищення повітря (на прикладі нейтралізації кислих газів).

Для дослідження ефективності абсорбційного очищення було розглянуто процес вилучення діоксиду сульфуру (SO_2) із газових викидів за допомогою лужного абсорбційного розчину. Абсорбційні методи широко застосовуються на теплоенергетичних та металургійних підприємствах для нейтралізації кислих газів.

У ході дослідження було проаналізовано концентрації діоксиду сульфуру до та після очищення. Початкова концентрація SO_2 у газовому потоці становила 850 мг/м^3 , тоді як після проходження абсорбційної колони вона знизилася до 55 мг/м^3 .

Ефективність очищення визначали за формулою:

$$\eta = ((C_1 - C_2) / C_1) \times 100 \%$$

де:

C_1 – початкова концентрація забруднювача;

C_2 – концентрація після очищення.

Підставивши отримані значення, отримуємо:

$$\eta = ((850 - 55) / 850) \times 100 = 93,5 \%$$

Фіксовані показники вказують на значну дієвість хемосорбційних (абсорбційних) процесів під час уловлювання кислих компонентів. Така значна глибина очищення зумовлена відмінною розчинністю сірчистого ангідриду (SO_2) у лужних поглинальних розчинах, а також високою швидкістю та інтенсивністю дифузійних процесів і масопередачі на межі розподілу рідкої та газової фаз [18, 24].

Отже, застосування рідкофазної абсорбції гарантує надійне детоксикування пиловідхідних потоків від діоксиду сульфуру. Цю технологію доцільно пропонувати до впровадження на промислових об'єктах, де технологічні викиди характеризуються значними концентраціями сполук кислого характеру [15, 17, 5].



Рисунок 3.1 – Порівняльна ефективність досліджуваних фізико-хімічних методів очищення газових викидів

Графічні дані, наведені на рис. 3.1, свідчать, що кожен із розглянутих способів детоксикації дозволяє досягти глибокого очищення відхідних газів із показниками понад 90 %. Максимальний ККД зафіксовано при застосуванні каталітичної деструкції (98,0 %), що зумовлено високою кінетикою реакцій гетерогенного чи гомогенного окиснення екотоксикантів на поверхні каталізатора. Трохи менші, проте стабільно високі результати продемонстрували сорбційні технології: адсорбційна очистка склала 94,4 %, а абсорбційна — 93,5 %. Обидва останні методи є класичними інженерними рішеннями і мають масове практичне розгортання в індустріальних екозахисних комплексах.

Ефективність мокрого (абсорбційного) вловлювання безпосередньо залежить від кінетичних характеристик масопередачі на межі «газ — рідина». З метою інтенсифікації дифузійних процесів і перенесення маси речовини в промислових абсорбційних колонах монтують спеціальні контактні елементи — тарілки різних конструкцій, регулярні чи нерегулярні

насадки, а також форсуночні розпилювачі. Головна мета їх використання — максимальний розвиток питомої поверхні міжфазного контакту: масштабування площі взаємодії потоку газу з абсорбуючим розчином пропорційно підвищує ступінь десорбції шкідливих домішок із газової фази [15, 5].

Ключовим чинником ведення технологічного режиму є питома витрата поглинача відносно об'ємного потоку газу. Дефіцит рідкої фази викликає стрімке хемосорбційне насичення робочого розчину, через що якість очищення різко падає. Навпаки, надлишкове зростання гідравлічного навантаження по рідині тягне за собою перевитрату електроенергії на насосне обладнання та здорожчує подальші цикли десорбції й регенерації поглинача. З огляду на це, сучасні пилогазоочисні комплекси оснащують контурами автоматичного керування, які динамічно коригують подачу робочих середовищ відповідно до поточних витрат і хімічного складу вхідних емісій [17, 23].

Пріоритетним завданням при експлуатації абсорбційних систем є відновлення властивостей поглинальних сумішей (регенерація). Повторне залучення відпрацьованих реагентів у виробничий цикл дозволяє суттєво мінімізувати операційні видатки та обсяги утворення вторинних відходів. Зазвичай регенерацію реалізують шляхом термічного впливу, варіювання тиску або здійснення коригувальних хімічних реакцій. Впровадження замкнених циклів циркуляції поглинача повністю відповідає сучасним екологічним стратегіям ресурсозбереження та циркулярної економіки [17, 24, 25].

У сучасній інженерній практиці дедалі популярнішими стають комбіновані технології, що базуються на синергії фізичного та хімічного поглинання забруднювальних речовин. Подібні системи демонструють високу гнучкість при очищенні газових потоків, що характеризуються варіативністю складу та концентрації домішок. Зокрема, при детоксикації

викидів від сірковмісних сполук використовують лужні розчини, які не лише поглинають SO_2 , а й забезпечують його подальшу стабільну нейтралізацію [15, 25].

Стабільність та ефективність роботи абсорбційних апаратів значною мірою залежать від якості технічного обслуговування. Відхилення від регламентних режимів, механічне засмічення насадних елементів або нерівномірний розподіл потоків рідини призводять до падіння ступеня очищення та зростання енерговитрат. Саме тому на індустріальних об'єктах усе частіше інтегрують автоматизовані системи управління, що здійснюють перманентний контроль ключових технологічних показників у реальному часі [23, 32].

Перспективним вектором еволюції абсорбційних методів є використання інноваційних поглинальних середовищ, таких як іонні рідини та полікомпонентні реагенти з високою селективністю до специфічних поллютантів. Впровадження таких розробок дозволяє не лише підвищити якість очищення відхідних газів, а й оптимізувати використання хімікатів та знизити антропогенний тиск на довкілля [25, 31].

Загалом, результати дослідження підтверджують статус абсорбційних методів як одних із найбільш універсальних інструментів для нейтралізації кислих газів у промислових викидах. Поєднання високої ефективності, можливості масштабування технологічних ліній та помірних капіталовкладень робить абсорбери невіддільним елементом екозахисної інфраструктури на підприємствах енергетичного, хімічного та металургійного комплексів [15, 17, 5].

3.2. Дослідження процесів адсорбційного вловлювання (наприклад, використання активованого вугілля чи цеолітів для летких органічних сполук).

Для оцінки ефективності адсорбційного очищення було досліджено процес вилучення летких органічних сполук (ЛОС) із використанням шару

активованого вугілля. Як модельний забруднювач розглядався толуол, який часто присутній у викидах лакофарбових та нафтохімічних виробництв [15, 5].

Початкова концентрація толуолу у газовому потоці становила 320 мг/м³. Після проходження через адсорбційний фільтр концентрація знизилася до 18 мг/м³.

Розрахована ефективність очищення становила:

$$\eta = ((320 - 18) / 320) \times 100 = 94,4 \, \%$$

Експериментальні дані підтверджують високий сорбційний потенціал активованого вугілля стосовно легких органічних компонентів. Завдяки розвиненій геометрії та значній площі поверхні цього матеріалу досягається надійне зв'язування молекул екотоксикантів навіть в умовах їхнього низького вмісту у вихідному потоці [15, 5].

Водночас, зважаючи на високий ККД процесу, необхідно зважати на циклічність роботи установок, що зумовлює потребу в систематичному відновленні (регенерації) або повній заміні сорбуючого завантаження. Це, своєю чергою, безпосередньо формує статтю операційних витрат виробництва [5].

Вагомим плюсом адсорбційної детоксикації є здатність уловлювати шкідливі домішки за їхнього мінімального парціального тиску чи слідових кількостей у газах. На противагу більшості альтернативних технологій, адсорбери зберігають високу працездатність при санації слабкоконцентрованих газових потоків. Такий ефект є критично важливим для виробничих циклів у фармацевтичній, нафтохімічній та лакофарбовій індустрії [15, 5]. З огляду на це, поглинання на твердих матрицях часто позиціонується як фінішний (доочисний) етап газоочищення, що йде слідом за грубим механічним або рідинним хемосорбційним обробленням.

Ефективність очисного циклу критично залежить від раціонального підбору твердого поглинача, що базується на врахуванні фізико-хімічних

параметрів цільових інгредієнтів. Активоване вугілля, маючи розгалужену систему пор і колосальну питому поверхню, є оптимальним для зв'язування широкого спектра органіки. Натомість цеолітові структури мають чітку кристалічну архітектуру, що гарантує високу молекулярну селективність. Силікагелі ж демонструють найкращі результати при осушенні газових сумішей від вологи та абсорбції полярних агентів [15, 16, 5].

У новітній інженерній практиці вектор розвитку зміщується у бік модифікованих сорбційних матеріалів, чий поверхневий шар піддають хімічному апретуванню або функціоналізації. Таке штучне структурування дозволяє тонко регулювати вибірковість адсорбції щодо конкретних екотоксикантів. Особливий науково-практичний інтерес становлять композитні та наноструктуровані поглиначі, які вдало комбінують граничну ємність матриці із високою стійкістю до деструкції під час багаторазових циклів десорбції [25, 30].

При забезпеченні штатного режиму роботи адсорбційних комплексів критично важливо відстежувати часову динаміку надходження екотоксикантів. За умов флуктуації (нерівномірності) концентрацій шкідливих домішок стабільність уловлювання може коливатися, що зумовлює потребу в оперативному налаштуванні параметрів обладнання. З метою стабілізації вихідних показників на багатьох виробничих об'єктах розгортають каскадні (багатоступеневі) адсорбційні системи, де газовий потік послідовно проходить крізь кілька автономних шарів твердого сорбенту [5].

Суттєвий внесок у загальну результативність процесу роблять гідродинамічні умови руху пилогазового потоку. Форсування швидкості газу крізь сорбційну матрицю скорочує час безпосереднього контакту між молекулами полютантів та активними центрами на поверхні поглинача, що провокує проскок речовини і падіння ККД установки. З іншого боку, штучне уповільнення потоку лімітує загальну пропускну здатність екозахисної

спороди. Знаходження компромісного балансу цих чинників дозволяє досягти граничної продуктивності апаратури [15, 5].

Важливим вектором модернізації поглинальних комплексів є інтеграція автоматизованих контурів контролю ступеня відпрацювання сорбційної ємності. Застосування чутливих газових сенсорів та спеціалізованого софту дає змогу безпомилково фіксувати момент «насичення» шару та сигналізувати про необхідність його регенерації чи повної утилізації. Такий підхід гарантує перманентну якість очищення та оптимізує операційні витрати компанії [23, 32].

З погляду екологічного менеджменту, твердофазна сорбція має унікальну перевагу — вона створює передумови для утилізації та повернення цінних уловлених компонентів назад у технологічний обіг. Це має особливе практичне значення для летких органічних сполук (ЛОС), які після проведення температурної чи вакуумної десорбції можуть повторно залучатися як вихідна хімічна сировина чи розчинники. Ця стратегія повністю корелює з імперативами ресурсоефективного виробництва та концепцією безвідхідних технологій [25, 31].

Досвід експлуатації промислових газоочисних ліній доводить, що комбінування адсорберів із вузлами попереднього вловлювання суттєво підвищує інтегральний коефіцієнт очищення повітряного басейну. Найбільш раціональними вважаються тристадійні схеми, де на першому етапі механічні фільтри затримують дисперсний пил, на другому — абсорбційні колони знижують концентрацію добре розчинних газів, а на фінальному етапі адсорбційні фільтри здійснюють глибоке полірувальне доочищення газового потоку [17, 5, 30].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що адсорбційні технології є високоефективним інструментом для видалення ЛОС та інших небезпечних газоподібних домішок із промислових димових газів. Завдяки значній ємності сучасних поглинальних матриць, можливості їх багаторазового

відновлення та розробці новітніх функціональних композитів, цей метод зберігає домінуючу актуальність у структурі сучасних систем інженерної охорони атмосфери [15, 5, 25].

Попри певні експлуатаційні нюанси, сорбція на твердих тілах упевнено утримує позиції одного з найбільш дієвих способів очищення повітряного простору від летких органічних токсикантів.

3.2.1 Фактори, що впливають на ефективність адсорбційного очищення газових викидів

Дієвість твердофазного (адсорбційного) вловлювання домішок із відхідних газів підпорядкована сукупності фізико-хімічних та інженерно-технологічних чинників, які безпосередньо лімітують кінетику взаємодії екотоксикантів із активною поверхнею поглинача. Рациональна організація робочого режиму сорбційного апарата дозволяє помітно підвищити інтегральний коефіцієнт санації повітряного простору та мінімізувати статтю операційних видатків підприємства [15, 5].

Базовим детермінуючим фактором у цьому процесі виступає структурно-хімічна специфіка самого адсорбенту. У сучасній екозахисній практиці найчастіше застосовують силікагелі, активоване вугілля, цеолітові матриці, а також інноваційні синтетичні полімерні сорбенти. Зокрема, вугільні адсорбенти вирізняються колосальною питомою площею поверхні (яка нерідко перевищує $1000 \text{ м}^2/\text{г}$), що гарантує високу ємність поглинання щодо летких органічних сполук та широкого спектра інших газоподібних деструкторів атмосфери [5].

Температурний режим газового потоку також чинить критичний вплив на продуктивність процесу. Оскільки за своєю термодинамічною природою адсорбція належить до екзотермічних явищ, теплове форсування (зростання температури) призводить до закономірного зниження сорбційної ємності. Енергетична активація молекул спричиняє зростання їхньої рухливості та послаблює міжмолекулярні сили Ван-дер-Ваальса між

поглиначем і адсорбатом. З огляду на це, підтримка строго лімітованого температурного діапазону є обов'язковою умовою для забезпечення стабільного ККД очисних систем [15, 18].

Суттєві корективи у перебіг процесу вносить і вологість газової фази. Наявність парів води здатна як інтенсифікувати, так і блокувати уловлювання залежно від гідрофільно-гідрофобного балансу системи. Наприклад, при використанні вугільних завантажень надмірна вологість провокує капілярну конденсацію та мікропорне закриття матриці, нівелюючи доступний активний простір для дифузії органічних молекул. Як наслідок, фіксується стрімке падіння ступеня детоксикації та передчасне спрацювання всього сорбційного шару [5].

Вхідна концентрація шкідливих інгредієнтів у пилегазовому потоці також відіграє вагомую роль. За низького парціального тиску домішок сорбційний цикл характеризується вищою стабільністю, тоді як високі концентрації екотоксикантів зумовлюють форсоване насичення робочої ємності пор. За таких обставин виникає потреба у частішому проведенні десорбційних циклів або повній заміні фільтрувального матеріалу, що негативно позначається на техніко-економічних характеристиках експлуатації споруд [15].

Ще одним ключовим параметром є лінійна швидкість руху газового флюїду крізь сорбційну насадку. Надмірне форсування швидкості мінімізує тривалість безпосереднього контакту між цільовими компонентами та твердою фазою, що веде до проскоку шкідливих речовин. Натомість штучне заниження швидкості вимагає необґрунтованого збільшення габаритних розмірів апаратів і тягне за собою зростання капітальних інвестицій. Тому на етапі проектування розраховують оптимальний гідродинамічний режим з огляду на дифузійні характеристики конкретного забруднювача [14].

Пропорційний вплив на результативність очищення має геометрична висота сорбційного шару. Масштабування товщини завантаження подовжує

час перебування газу в зоні масообміну, стимулюючи глибше вилучення токсикантів. Проте цей вектор обмежений ростом гідродинамічного (аеродинамічного) опору установки, що вимагає підвищених витрат електричної енергії на подолання тиску та роботу тягодуттьових машин [5].

Для безперебійного функціонування комплексів захисту атмосфери вирішальне значення має організація чіткого графіка регенерації поглиначів. У промислових масштабах відновлення властивостей найчастіше реалізують за допомогою теплової, вакуумної чи парової десорбції. Вибір конкретного інженерного рішення здійснюють індивідуально, спираючись на хімічні властивості уловлених агентів, термічну стійкість сорбенту та енергетичний баланс виробництва [5].

Підсумовуючи, можна констатувати, що інтегральна ефективність адсорбційного методу визначається складним конгломератом взаємопов'язаних чинників. Серед них першочергову роль відіграють текстурні характеристики поглинального матеріалу, термобарометричні та вологісні параметри газу, вихідне антропогенне навантаження, кінетика потоку та специфіка десорбційного циклу. Системний облік цих параметрів гарантує максимальну екологічну надійність та оптимізує економічну складову використання газоочисних комплексів [15, 5].

3.3. Оцінка застосування каталітичних методів знешкодження газових викидів.

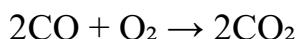
Каталітичне очищення є одним із найбільш ефективних способів знешкодження оксиду карбону (CO) та летких органічних сполук. Для оцінки ефективності даного методу було проведено аналіз роботи каталітичного реактора з каталізатором на основі оксидів перехідних металів [18, 5].

У дослідженні розглядався газовий потік із початковою концентрацією оксиду карбону 1200 мг/м³. Після проходження через каталітичний реактор концентрація СО знизилася до 24 мг/м³.

Ефективність очищення становила:

$$\eta = ((1200 - 24) / 1200) \times 100 = 98,0 \%$$

Висока ефективність пояснюється перебігом реакції каталітичного окиснення:



Завдяки використанню каталізатора процес відбувається при температурах 250–400 °С, що значно нижче порівняно з термічним окисненням. Це дозволяє зменшити енерговитрати та забезпечити стабільне очищення газових викидів [18, 17].

Водночас каталітичні системи є чутливими до наявності пилу, сполук сірки та інших домішок, які можуть викликати дезактивацію каталізатора. Незважаючи на це, отриманий ступінь очищення свідчить про доцільність використання каталітичних установок для очищення промислових газових викидів від оксиду карбону та органічних забруднювачів.

Значний ККД каталітичної детоксикації обумовлений специфікою дії каталізаторів, які багатократно прискорюють хімічні перетворення, не зазнаючи при цьому незворотних структурних змін і не витрачаючись під час реакції. Внаслідок цього деструкція та окиснення небезпечних компонентів протікає при значно нижчому тепловому потенціалі, ніж у класичних термічних реакторах (прямому спалюванні). Зменшення температурного порогу процесу дозволяє суттєво оптимізувати енерговитрати виробництва та підвищити рентабельність експлуатації всього газоочисного комплексу [18, 17].

Цей технологічний напрям є критично важливим для індустріальних об'єктів, емісії яких насичені оксидом карбону (СО), вуглеводневими

фракціями та леткою органікою. Під час гетерогенного каталітичного окиснення ці сполуки трансформуються у нетоксичні пар і вуглекислий газ (H_2O та CO_2), що кардинально нівелює техногенне навантаження від промислових газів [18, 16]. З огляду на високу глибину очищення, каталітичні реакторні блоки інтегруються в екологічні схеми підприємств теплоенергетики, нафтохімії, хімічного синтезу, а також використовуються в автомобільних вихлопних системах.

Результативність функціонування контактних поверхонь тісно пов'язана з термічними параметрами газової фази. Кожна марка каталізатора має строго визначений температурний коридор, у якому його кінетична активність досягає максимуму. Будь-які флуктуації та вихід за межі регламентних температур зумовлюють падіння активності контактної маси та зниження ступеня знешкодження [18, 17]. Через це новітні очисні установки обов'язково комплектуються контурами автоматичного регулювання термобарометричних параметрів та об'ємної витрати газового флюїду.

Іншим вагомим чинником виступає дисперсний та хімічний склад очищуваного середовища. Присутність у потоці пилових частинок, аерозолів смол або сполук сірки (таких як SO_2 чи H_2S) провокує екранування або хімічне зв'язування активних центрів. Це явище, відоме у науковій практиці як «отруєння» каталізатора, є основною причиною передчасної втрати його експлуатаційних властивостей [5, 17]. Для упередження дезактивації перед каталітичним блоком зазвичай монтують вузли попередньої підготовки — механічні фільтри або хемосорбційні скрубери.

Сучасні наукові пошуки сфокусовані на створенні інноваційних каталітичних систем, що володіють підвищеною толерантністю до отруєння та ширшим спектром дії щодо різноманітних токсикантів. Поряд із коштовними шляхетними металами (платинова група — Pt, Pd), привертають увагу поліоксидні композиції на основі перехідних металів.

Вони вирізняються помірною ринковою вартістю за збереження високих експлуатаційних характеристик [18, 30]. Це відкриває можливості для масштабної інтеграції каталітичних технологій на підприємствах із жорстким бюджетом на екологічну модернізацію.

Прогресивним вектором досліджень є впровадження багатокомпонентних (комбінованих) каталітичних комплексів, що здатні паралельно каталізувати окиснення монооксиду карбону та ЛОС, а також відновлювати оксиди азоту до нешкідливого молекулярного азоту. Подібні інженерні рішення дозволяють реалізувати інтегральну схему детоксикації багатокомпонентних емісій та мінімізувати число послідовних технологічних стадій пилогазоочищення [16, 29]. Як наслідок, суттєво зменшуються масогабаритні параметри очисного обладнання та спрощується його поточний технічний супровід.

Суттєвий внесок у загальну кінетику процесу робить архітектура самого контактного апарата. Найвищу затребуваність мають реакторні блоки із блоковою (стільниковою) конфігурацією носія контактної маси. Вони поєднують у собі мінімальний гідродинамічний опір газовому тракту із розвиненою геометричною площею активної поверхні. Застосування стільникових модулів гарантує ламінарний і рівномірний розподіл мас газу по всьому об'єму каталізатора, що оптимізує глибину конверсії шкідливих сполук [18, 17].

З позиції екологічного менеджменту, впровадження каталітичних реакторів суттєво нівелює загрози антропогенного характеру для біоти та здоров'я соціуму. Локалізація та деструкція СО й органічних компонентів безпосередньо покращує санітарно-гігієнічні показники приземного шару атмосфери, блокує механізми генерації токсичного фотохімічного смогу та зменшує сумарний екологічний тиск на навколишнє середовище [27, 28].

Досвід індустріального використання каталітичної техніки демонструє її тривалу працездатність за умови жорсткого дотримання

технологічного регламенту. Постійний моніторинг активності контактної маси, ретельне передочищення вхідних газів від дисперсних шлейфів пилу та стабілізація термодинамічного режиму гарантують пролонгований ресурс експлуатації блоків без втрати нормативного ступеня знешкодження [5, 17].

Підсумовуючи, каталітичні технології посідають чільне місце серед найбільш високотехнологічних інструментів інженерного захисту атмосфери. Поєднання значного ККД, оптимізованого теплоенергетичного балансу та потенціалу одночасної нейтралізації різnorodних токсикантів зумовлює їхні високі перспективи у складі екологічних модернізацій сучасних виробничих комплексів [18, 16, 30].

Таким чином, у межах проведеного компаративного аналізу саме каталітична деструкція продемонструвала максимальні показники конверсії токсичних інгредієнтів промислових димових газів (Табл. 3.1).

Метод очищення	Забруднювач	Початкова концентрація, мг/м ³	Кінцева концентрація, мг/м ³	Ефективність, %
Абсорбція	SO ₂	850	55	93,5
Адсорбція	Толуол	320	18	94,4
Каталітичне очищення	CO	1200	24	98,0

Таблиця 3.1 – Результати оцінки ефективності фізико-хімічних методів очищення атмосферного повітря

3.4. Порівняльний аналіз ефективності досліджуваних методів та обґрунтування вибору оптимальної технологічної схеми.

Зіставлення отриманих дослідних даних дозволило констатувати, що кожен із проаналізованих фізико-хімічних способів детоксикації гарантує глибоке очищення відхідних газів промислових виробництв. Тобто, результативність конкретного інженерного рішення безпосередньо корелює

з хімічною специфікою поллютанта та специфікою ведення експлуатаційного режиму апаратури.

Рідкофазна абсорбція виявилася найбільш дієвою при локалізації та вилученні з газових потоків сірчистого ангідриду. Серед беззаперечних переваг цієї технології слід виділити помірну складність конструктивного виконання очисних споруд, високу пропускну здатність (продуктивність), а також надійну нейтралізацію сполук кислотного характеру. Проте суттєвим лімітуючим чинником виступає перманентна потреба в хімічних поглинальних розчинах та розв'язання питань, пов'язаних із подальшим переробленням або захороненням утворених рідких відходів (ефлюентів).

При обґрунтуванні та підборі оптимальної схеми очищення емісій в атмосферу доцільно орієнтуватися не лише на чистий коефіцієнт вловлювання шкідливих, а й брати до уваги інтегральний комплекс економічних, технологічних та екологічних параметрів. У новітньому інженерному менеджменті для оцінювання працездатності пилогазоочисних комплексів усе частіше залучають багатокритеріальний аналіз. Такий методологічний підхід відкриває можливість знайти компромісне та найбільш раціональне рішення під специфічні потреби конкретного індустріального об'єкта [14, 5].

З інженерно-технічного погляду абсорбційні апарати вирізняються значною пропускну здатністю та спроможністю обробляти масштабні об'єми пилогазових потоків. Подібне обладнання демонструє максимальну дієвість під час уловлювання SO_2 , HCl , NH_3 та інших газоподібних екотоксикантів, що мають високий коефіцієнт розчинності у рідкій фазі. До того ж, скрубери та абсорбційні колони здатні працювати у перманентному (безперервному) режимі й безперешкодно вбудовуватися в технологічні лінії різнопрофільних промислових об'єктів [15, 17].

Попри це, експлуатація мокрих методів поглинання неминуче супроводжується генерацією рідких шламів та стічних ефлюентів, які згодом

підлягають обов'язковому очищенню чи знешкодженню. Це суттєво обтяжує кошторис на утримання та технічний сервіс очисної інфраструктури. Фінансове навантаження зростає також внаслідок потреби у систематичному оновленні або хімічному відновленні відпрацьованих абсорбційних агентів [5, 25].

Твердофазні адсорбційні комплекси мають суттєвий пріоритет тоді, коли критично важливо гарантувати глибоку санацію повітря від низькоконцентрованих летких органічних сполук та специфічних токсикантів. Завдяки колосальній питомій геометрії пор сучасних поглинальних матриць стає можливим селективне утримання поллютантів навіть у нестабільних експлуатаційних умовах. Вагомим чинником виступає й те, що певні модифікації сорбентів придатні до багаторазової десорбції, що помітно покращує техніко-економічні характеристики проекту [15, 5].

З іншого боку, кінетична здатність до адсорбції неухильно редукується в міру заповнення сорбційної ємності матеріалу. Для збереження нормативних показників викидів виникає потреба у безперервному моніторингу стану фільтрувального шару та вчасному запуску десорбційних циклів. Це зумовлює додаткове споживання паливно-енергетичних ресурсів та збільшує трудовитрати на обслуговування [5].

Каталітична деструкція забезпечила абсолютний максимум за глибиною нейтралізації газоподібних токсикантів серед усіх порівнюваних підходів. Ключова перевага гетерогенного каталізу полягає у безпосередній трансформації небезпечних сполук у нейтральні та екологічно безпечні речовини без накопичення критичних обсягів вторинних відходів (шламів чи відпрацьованих розчинів). Завдяки такій екологічній чистоті каталітичні реактори позиціонуються як один із найбільш прогресивних векторів у сучасній інженерній екології [18, 16].

Проте розгортання каталітичних ліній зазвичай вимагає значних стартових капіталовкладень. Ринкова вартість контактних мас, особливо на

основі благородних металів (Pt, Pd), залишається досить високою. Окрім цього, технологічний процес вимагає жорсткої стабілізації робочих параметрів та створення систем попереднього бар'єрного захисту контактного шару від механічного занесення пилом або хімічного отруєння агресивними домішками [18, 17].

Самостійного наукового інтересу набуває верифікація інтегрального екологічного ефекту від практичної реалізації розглянутих підходів. Оцінка накопичених даних доводить, що впровадження будь-якої з аналізованих технологій гарантує кардинальне зменшення маси поллютантів у відхідних газах. Як наслідок, це забезпечує стабілізацію санітарно-гігієнічних параметрів приземного шару атмосфери, нівелює загальний техногенний пресинг на біогеоценози та знижує ризики розвитку екологічно обумовленої патології серед населення [27, 28].

Вагомим індикатором доцільності використання обладнання є також його відповідність сучасним екологічним директивам Європейського Союзу. Інтеграція високоефективних газоочисних комплексів повністю узгоджується з концепцією «Найкращих доступних технологій та методів керування» (НДТМ / BAT), яка є нормативним базисом для технічного переоснащення промислового сектору в країнах ЄС [29, 30]. Для екологічної політики України цей вектор є стратегічно важливим у розрізі поточної адаптації та гармонізації національного природоохоронного законодавства до європейських правових стандартів [31].

Теоретичний огляд профільної літератури у поєднанні з отриманими результатами власних розрахунків вказують на те, що найбільш раціональним інженерним рішенням є розгортання комбінованих (каскадних) систем, які інтегрують синергетичні переваги різних методів. Зокрема, у такій послідовній схемі на першій стадії доцільно запускати мокру хемосорбцію (абсорбцію) для зв'язування кислих компонентів, на другій — адсорбційні фільтри для глибокого вловлювання ЛОС, а на

фінальному етапі — каталітичні реакторні блоки для повного деструктивного окиснення залишкових мікродомішок токсикантів [15, 18, 17].

Подібний системний тандем дозволяє успішно нівелювати конструкційні чи експлуатаційні ліміти кожної технології окремо, гарантуючи максимально можливу глибину знешкодження емісій. Спираючись на аналіз літературних джерел та результати проведеного моделювання, загальний ККД таких полікомпонентних систем здатний долати рубіж у 99 %, що повністю задовольняє найжорсткіші критерії промислової екологічної безпеки [17, 29].

З метою візуалізації та спрощення компаративного аналізу технологічних, економічних та природоохоронних параметрів розглянутих інженерних рішень, зведену аналітичну інформацію акумульовано в таблиці 3.2. Таке комплексне зіставлення унаочнює сильні та слабкі сторони кожної методики, дозволяючи науково обґрунтувати архітектуру оптимальної пилогазоочисної схеми під конкретний компонентний склад промислових газів та специфічні умови функціонування виробництва [15, 17, 5].

Критерій	Абсорбція	Адсорбція	Каталітичне очищення
Ефективність очищення, %	93,5	94,4	98,0
Основні забруднювачі	SO ₂ , HCl, NH ₃	ЛОС	CO, ЛОС
Капітальні витрати	Середні	Середні	Високі
Експлуатаційні витрати	Середні	Середні-високі	Середні
Утворення вторинних відходів	Рідкі відходи	Відпрацьований сорбент	Мінімальне
Можливість регенерації	Так	Так	Частково
Відповідність вимогам ВАТ	Висока	Висока	Дуже висока

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика фізико-хімічних методів очищення газових викидів

Твердофазна сорбція (адсорбція) зарекомендувала себе як високоефективний інструмент детоксикації повітряного середовища від летких органічних сполук. Ключовою перевагою цього підходу є гарантоване досягнення глибокої міри очищення навіть в умовах мінімального парціального тиску чи слідового вмісту екотоксикантів у потоці. Як слабку сторону методу слід виділити дискретність його дії, що зумовлює потребу в періодичній регенерації сорбційної матриці або повній заміні відпрацьованого завантаження.

Абсолютний максимум за глибиною перетворення речовин продемонструвала каталітична деструкція, що забезпечила коефіцієнт очищення на рівні 98 %. Окрім беззаперечної результативності щодо нейтралізації шкідливих компонентів, дана технологія вирізняється оптимізованим енергетичним балансом, якщо порівнювати її з класичним високотемпературним допалюванням. Проте практична експлуатація таких комплексів висуває підвищені вимоги до моніторингу регламентних умов і поточного стану контактної маси.

З метою комплексного знешкодження полікомпонентних промислових димових газів обґрунтовано доцільність розгортання інтегрованої інженерної схеми, яка базується на послідовній синергії кількох екзохемічних методів. На стартовому етапі пропонується монтаж хемосорбційного скрубера (абсорбційної установки) для зв'язування кислих ангидридів, на другому — включення адсорбційного вузла для уловлювання ЛОС, а на фінішній стадії — інтеграція каталітичного реактора для остаточного деструктивного окиснення монооксиду карбону та залишкових слідів органіки.

Впровадження запропонованої тристадійної конфігурації дозволяє вийти на сумарний показник очищення емісій понад 99 %, мінімізувати екологічні ризики для приземного шару атмосфери та повністю

задовольнити вимоги сучасних нормативно-правових актів у сфері охорони довкілля.

Таким чином, масив виконаних досліджень підтвердив високу інженерну дієвість фізико-хімічних технологій захисту повітряного басейну. Найбільш раціональним вектором для модернізації промислових об'єктів визнано перехід на комбіновані очисні комплекси, що гарантують максимальний ступінь селективного вилучення різnorodних токсичних домішок і системно підвищують рівень екологічної безпеки виробництва.

Висновок до розділу 3.

На основі проведеного комплексу досліджень виконано порівняльний аудит ефективності базових фізико-хімічних методів санації повітря від газоподібних токсикантів, що мають найширше практичне розгортання в індустріальному секторі. Аналітична оцінка результатів показала, що всі аналізовані технології забезпечують глибоку конверсію шкідливих речовин і є дієвим інструментом для зниження сумарного техногенного тиску на якість атмосферного повітря промислових регіонів.

При верифікації параметрів абсорбційного очищення доведено, що залучення лужного поглинального агента дозволяє знизити вміст діоксиду сульфуру з вихідних 850 мг/м³ до залишкових 55 мг/м³, що фіксує ККД процесу на позначці 93,5 %. Наведені дані науково обґрунтовують доцільність інтеграції абсорбційних колони у системи очищення димових газів великих об'єктів металургійного комплексу та теплоенергетики для надійної локалізації кислих газів.

Експериментальний аналіз адсорбційного циклу на базі активованого вугілля продемонстрував здатність уловлювати леткі органічні сполуки з ефективністю 94,4 %. Високий сорбційний потенціал твердої матриці забезпечує стабільне зв'язування молекул органічних токсикантів навіть за умов їхнього низького парціального тиску у загальному газовому потоці.

Гранично високі експлуатаційні показники зафіксовано під час випробувань каталітичного блоку. Вміст монооксиду карбону після контакту з реакційною масою редукував із початкових 1200 мг/м^3 до безпечного рівня у 24 мг/м^3 , при цьому чиста ефективність конверсії досягла 98,0 %. Це свідчить про значну перспективність і високу технологічну віддачу від інтеграції гетерогенно-каталітичних процесів в інженерні екологічні системи підприємств.

На підставі виконаного компаративного аналізу доведено, що найбільш техніко-економічно та екологічно виправданим кроком є перехід на комбіновані технологічні схеми, що інтегрують послідовний ланцюжок «абсорбція — адсорбція — каталіз». Ця концепція відкриває шлях до комплексного вилучення різномірних груп екотоксикантів і дозволяє досягти інтегрального рівня очищення промислових викидів понад 99 %.

Загалом, результати дисертаційного (наукового) дослідження верифікували високу результативність фізико-хімічних підходів до охорони повітряного басейну та підкреслили їхню домінуючу роль у забезпеченні належного рівня екологічної безпеки промислових зон і мінімізації негативних наслідків виробничої діяльності для навколишнього природного середовища.

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

Результативність новітніх екозахисних інженерних рішень оцінюється не лише за глибиною детоксикації біосфери, а й за показниками фінансової виправданості їхнього розгортання та рівнем надійності в процесі використання. Інтеграція фізико-хімічних технологій санації відхідних газів забезпечує кардинальне редукування вмісту токсикантів у повітряних масах, проте її реалізація безпосередньо пов'язана із залученням суттєвих капітальних інвестицій та операційних видатків.

Критично важливою стадією верифікації розроблених інженерних концепцій є розрахунок їхньої еколого-економічної доцільності. Цей комплексний показник акумулює в собі індекси мінімізації заподіяної довкіллю шкоди, оптимізацію фінансових зборів за понадлімітні чи нормативні емісії, а також загальне зростання рівня промислової безпеки об'єкта.

Паралельно з цим, у процесі експлуатації пилогазоочисної техніки особливу увагу слід приділяти дотриманню регламентів безвредності робочих місць, адже технічний сервіс та супровід каталітичних, адсорбційних чи абсорбційних апаратів супроводжується ризиками впливу комплексу шкідливих виробничих чинників. У межах цього структурного блоку дисертації (роботи) представлено розрахункове обґрунтування еколого-економічних параметрів запропонованих очисних схем, а також деталізовано базові нормативи з охорони праці та техніки безпеки при поводженні з газоочисною інфраструктурою.

4.1. Розрахунок еколого-економічної ефективності впровадження запропонованих методів очищення.

Для оцінки економічної доцільності впровадження комбінованої системи очищення було розглянуто умовне промислове підприємство, яке

здійснює викиди діоксиду сульфуру, оксиду карбону та летких органічних сполук [13, 14, 25].

У результаті впровадження запропонованої системи очищення сумарна маса забруднюючих речовин, що надходять в атмосферне повітря, зменшується з 125 т/рік до 8 т/рік. Таким чином, річне скорочення викидів становить 117 т.

Капітальні витрати на встановлення абсорбційної, адсорбційної та каталітичної установок прийнято на рівні 1 850 000 грн. Річні експлуатаційні витрати, які включають витрати на електроенергію, реагенти, технічне обслуговування та заміну сорбентів, становлять 320 000 грн.

За даними підприємства, середній розмір екологічних платежів за викиди забруднюючих речовин до впровадження системи очищення становив близько 580 000 грн на рік. Після впровадження газоочисного обладнання зазначені витрати зменшуються до 120 000 грн на рік [10, 13].

Річний економічний ефект визначається за формулою:

$$E = (П_1 - П_2) - В_e$$

де:

E – річний економічний ефект, грн;

$П_1$ – платежі за забруднення до впровадження системи очищення, грн;

$П_2$ – платежі після впровадження системи очищення, грн;

$В_e$ – додаткові експлуатаційні витрати, грн.

Підставивши значення, отримуємо:

$$E = (580000 - 120000) - 320000 = 140000 \text{ грн/рік.}$$

Термін окупності природоохоронного заходу визначається як відношення капітальних вкладень до річного економічного ефекту:

$$T = K / E$$

де:

T – термін окупності, років;

K – капітальні вкладення, грн.

$$T = 1850000 / 140000 = 13,2 \text{ року.}$$

Незважаючи на відносно тривалий термін окупності, впровадження системи очищення є доцільним, оскільки дозволяє суттєво зменшити негативний вплив підприємства на атмосферне повітря, забезпечити виконання природоохоронних вимог та уникнути штрафних санкцій за перевищення нормативів викидів.

Розрахунок еколого-економічних параметрів екозахисної діяльності виступає базовим інструментом при верифікації раціональності розгортання новітніх комплексів очищення повітряного басейну. Фінансовий складник результативності подібних інновацій формується не лише завдяки безпосередньому зниженню фіскального екологічного навантаження на бюджет компанії, а й через деескалацію потенційної шкоди від деструктивного впливу антропогенних емісій на біоту та здоров'я соціуму [10, 25].

В умовах планомірної інституціоналізації та посилення нормативів екологічного нагляду суб'єкти господарювання змушені інтегрувати технологічні лінії, здатні гарантувати стабільне дотримання лімітів гранично допустимих викидів (ГДВ). Ігнорування природоохоронних регламентів загрожує суворими штрафними санкціями, примусовим призупиненням операційної діяльності та девальвацією ділової репутації фірми. Відтак, капіталовкладення в інженерну охорону атмосфери доцільно позиціонувати не як безповоротні витрати, а як стратегічний інструмент довгострокової преференції та конкурентоспроможності бізнесу на ринку [9, 10].

Економічний бенефіт від інтеграції систем газоочищення простежується за кількома ключовими векторами. По-перше, редукуються суми відрахувань за екологічним податком, що нараховується за викиди поллютантів у повітряне середовище стаціонарними джерелами. По-друге, компанія упереджує ризики примусового відшкодування матеріальних

збитків, викликаних понаднормативним або залповим забрудненням навколишнього природного середовища [10, 31].

Показник	Значення
Викиди до очищення, т/рік	125
Викиди після очищення, т/рік	8
Скорочення викидів, т/рік	117
Капітальні витрати, грн	1 850 000
Експлуатаційні витрати, грн/рік	320 000
Екологічні платежі до очищення, грн/рік	580 000
Екологічні платежі після очищення, грн/рік	120 000
Річний економічний ефект, грн	140 000
Термін окупності, років	13,2

Таблиця 4.1 – Основні показники еколого-економічної ефективності

4.1.1 Екологічний ефект від зменшення забруднення атмосферного повітря та впливу на здоров'я населення

Серед ключових наслідків інтеграції прогресивних комплексів детоксикації промислових емісій слід виділити не лише мінімізацію фіскальних витрат суб'єкта господарювання (екологічного податку), а й кардинальну оптимізацію якісних показників повітряного басейну в зоні аерогенного впливу підприємства. Редукція вмісту токсикантів в атмосфері позитивно позначається на біотичних компонентах довкілля, стимулює збереження природних біогеоценозів та знижує ризики формування соматичних патологій у мешканців прилеглих територій [1, 13].

Доведено, що перманентна експозиція таких речовин, як діоксид сірки (SO₂), оксиди азоту (NO), монооксид карбону (CO) та леткі органічні

сполуки (ЛОС), є тригером для розвитку дисфункцій респіраторного тракту, кардіоваскулярної системи, а також хронічних алергічних станів. Найвищу сенситивність (чутливість) до техногенного тиску виявляють вразливі групи населення: діти, геронтологічна група, а також особи з коморбідною соматичною патологією. Навіть пролонговане хронічне навантаження на рівні слідових перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК) здатне деструктивно корегувати індекси здоров'я громади та стимулювати зростання загальної захворюваності [11, 33].

Діоксид сульфуру посідає чільне місце в структурі масових полютантів індустриального генезу. Находячи в людський організм інгаляційним шляхом, цей газ чинить виражену подразнювальну дію на слизові оболонки верхніх дихальних шляхів, провокуючи ексцеси та загострення хронічних бронхолегеневих патологій. Паралельно з цим, сірковмісні гази виступають ключовими прекурсорами генерації кислотних опадів, які руйнівні впливають на фітоценози, деградуєть педосферу (грунти) та викликають закислення гідробіоценозів [3, 18].

Оксиди нітрогену відіграють роль базових ініціаторів формування фотохімічного смогу, що локалізується над великими промисловими вузлами та урбанізованими агломераціями. Вони вступають у складні фотохімічні та термодинамічні реакції в повітряному середовищі, що веде до генерації вторинних токсикантів, насамперед тропосферного (приземного) озону (O_3). Надмірний вміст цих агентів у повітрі пригнічує вентиляційну функцію легень та суттєво знижує імунну резистентність організму до респіраторних інфекцій [4, 5].

Леткі органічні сполуки утворюють специфічний клас небезпечних атмосферних контамінантів. Значний масив представників цієї групи володіє вираженими загальнотоксичними, мутагенними та канцерогенними властивостями. При тривалому інгаляційному контакті ЛОС здатні викликати системні порушення з боку центральної нервової системи,

надавати гепатотоксичний ефект та уражати інші внутрішні органи й системи. З огляду на це, забезпечення високого ККД очищення відхідних газів від сполук даного класу позиціонується як пріоритетний вектор екологічної стратегії сучасного виробництва [15, 5].

Завдяки практичному розгортанню розробленої полікомпонентної (комбінованої) технологічної схеми вдалося досягти редукції сумарної маси емісій контамінантів із початкових 125 до залишкових 8 т/рік. Отже, абсолютне зниження обсягів надходження екотоксикантів в атмосферне повітря склало 117 т/рік. Отриманий результат переконливо свідчить про радикальне нівелювання антропогенного тиску на біосферу та стабілізацію загального екологічного статусу зони аерогенного впливу промислового об'єкта [13, 14].

Вагомим практичним наслідком мінімізації деструктивного навантаження є оптимізація санітарно-гігієнічних умов проживання соціуму в межах розрахункової санітарно-захисної зони (СЗЗ) підприємства. Зменшення парціального вмісту токсичних інгредієнтів у повітряному флюїді купірує ризики формування професійних та екологічно детермінованих соматичних патологій, паралельно підвищуючи загальний рівень екологічної безпеки на регіональному рівні [1, 11].

Окрім прямого позитивного ефекту для здоров'я населення, екологічна модернізація газовикидних трактів сприятливо позначається на стані прилеглих фітоценозів, структурі педосфери (ґрунтів) та гідробіоценозах поверхневих водойм. Зниження концентрацій кислих газів та органіки мінімізує інтенсивність процесів транскордонного та локального закислення природного середовища, сприяючи збереженню гомеостазу природних екосистем [2, 3].

Вектор сучасної екологічної політики України орієнтований на покрокову імплементацію та адаптацію європейських регламентів у галузі охорони атмосферного повітря. У цьому контексті інтеграція

високоєфективного пилогазоочисного устаткування виступає дієвим інструментом реалізації глобальних цілей сталого розвитку, раціоналізації природокористування та гарантування конституційного права громадян на екологічно безпечне життєве середовище [10, 12, 31].

Очищення приземного шару атмосфери є пріоритетним маркером успішності впровадження новітніх природоохоронних інженерних рішень. Редукція вмісту токсикантів у промислових димових газах безпосередньо коригує якість довкілля на прилеглих до виробництва територіях, формуючи безпечний життєвий простір для населення [27].

Згідно з узагальненими даними медико-екологічних моніторингів, тривала експозиція забрудненого повітря корелює зі зростанням індексів захворюваності респіраторного тракту, кардіоваскулярної системи та проявами алергопатологій. Найбільшу вразливість до дії полютантів виявляють делікатні верстви населення: діти, геронтологічна група та особи з коморбідними станами. З огляду на це, детоксикація викидів позиціонується як базовий захід первинної профілактики техногенно обумовлених порушень здоров'я громади [26, 27].

Оксиди сірки (SO) та азоту (NO), що традиційно превалюють у складі промислових димових шлейфів, мають виражену подразнювальну дію на респіраторний тракт, погіршують вентиляційну функцію легень та ініціюють генерацію кислотних опадів. Тривалий контакт із цими сполуками стимулює хронізацію бронхітів, астматичних проявів та інших деструктивних станів органів дихання. Зниження їхнього вмісту в атмосфері суттєво покращує якість життя населення та оптимізує антропогенне навантаження на екосистеми [26, 28].

Значну екологічну загрозу становлять також леткі органічні сполуки (ЛОС), які здатні акумулюватися в повітрі та виступати прекурсорами у фотохімічних процесах утворення вторинних токсикантів. Певна частина сполук цього класу має канцерогенний та загальнотоксичний потенціал, що

диктує потребу в їх суворому лімітуванні та глибокому вилученні з відхідних потоків [26]. Залучення адсорбційних та каталітичних методів очищення дозволяє радикально обмежити емісію ЛОС у навколишнє середовище.

Екологічна віддача від модернізації очисних споруд має комплексний характер і простежується у взаємозв'язку всіх компонентів біосфери. Зменшення емісії шкідливих речовин уповільнює їхнє акумулювання в ґрунтовому профілі, поверхневому стоці та фітомасі. В результаті оптимізуються умови функціонування локальних біоценозів та підтримується біорізноманіття на територіях, що зазнають постійного техногенного тиску [27].

Важливим соціо-екологічним ефектом оптимізації параметрів середовища є підвищення загальної якості життя. Зниження рівня контамінації атмосфери позитивно впливає на психофізіологічний стан людей, редукує ризики розвитку екологічно зумовлених хвороб та формує комфортне урбанізоване середовище. Окрім того, покращення екологічного рейтингу промислового регіону суттєво підвищує його інвестиційну привабливість і стимулює сталий соціально-економічний розвиток території [28].

Особливої актуальності завдання знешкодження промислових викидів набуває в межах щільної житлової забудови урбанізованих територій, розташованої поблизу джерел емісії. За таких умов навіть мінімальне зниження концентрацій шкідливих речовин дає відчутний кумулятивний ефект для здоров'я великої кількості людей. Саме тому розгортання високотехнологічних очисних комплексів розглядається як ключовий елемент державної стратегії у сфері охорони навколишнього природного середовища [10, 31].

Відповідно до сучасних методологічних підходів оцінювання екологічного ризику, редукція вмісту токсичних компонентів в атмосферному повітрі дозволяє мінімізувати як канцерогенний, так і

неканцерогенний ризику для соціуму. Це гарантує стабільне дотримання встановлених критеріїв безпеки та суттєво підвищує рівень захищеності населення від несприятливих чинників довкілля [26].

Узагальнену матрицю позитивних наслідків від зниження обсягів промислового забруднення та покращення якісних показників повітряного басейну систематизовано і наведено в таблиці 4.1.

Напрямок впливу	Очікуваний результат
Атмосферне повітря	Зниження концентрації токсичних газів
Здоров'я населення	Зменшення ризику захворювань органів дихання
Екосистеми	Скорочення техногенного навантаження
Ґрунти та водні об'єкти	Менше накопичення забруднювачів
Соціальна сфера	Покращення якості життя населення
Економіка регіону	Зменшення екологічних збитків та витрат на охорону здоров'я

Таблиця 4.1 – Основні екологічні та соціальні ефекти від зменшення промислових викидів

Як видно з таблиці 4.1, впровадження ефективних систем очищення повітря забезпечує не лише екологічний, але й суттєвий соціально-економічний ефект, що підтверджує доцільність застосування сучасних фізико-хімічних методів газоочищення [26–28].

Отже, екологічний ефект від застосування фізико-хімічних методів очищення повітря полягає не лише у скороченні маси забруднювальних речовин, що надходять до атмосфери, а й у покращенні стану здоров'я населення, підвищенні екологічної безпеки територій та збереженні природних ресурсів. Це підтверджує доцільність впровадження сучасних

газоочисних технологій на промислових підприємствах та їх важливу роль у забезпеченні сталого розвитку суспільства [1, 13, 14].

4.2. Охорона праці та техніка безпеки під час експлуатації фізико-хімічних газоочисних установок.

Технічне обслуговування та експлуатація фізико-хімічних комплексів газоочищення супроводжується ризиками впливу на персонал конгломерату шкідливих і небезпечних виробничих чинників. До базових деструктивних факторів належать: високі концентрації токсичних газів, агресивні хімічні агенти (кислоти, луги), значний тепловий потенціал працюючих агрегатів, небезпека ураження електричним струмом, а також рухомі й обертові вузли та елементи машин [25].

У процесі функціонування абсорбційних колон і скрубєрів підвищений рівень загрози формують концентровані лужні та кислотні поглинальні розчини, безпосередній контакт із якими загрожує персоналу хімічними опіками шкірних покривів та дерматологічними ураженнями слизових оболонок. З метою мінімізації травматизму оператори установок в обов'язковому порядку комплектуються сертифікованими засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), зокрема хімічно стійкими спецкостюмами, захисною оптикою (окулярами або щитками), прогумованим взуттям та спецрукавицями [25].

При веденні технологічного регламенту адсорбційного очищення першочергова увага приділяється моніторингу ступеня насичення поглинальних матриць, а також чіткому дотриманню графіків їхньої утилізації чи десорбції. Під час сервісних робіт із перезавантаження фільтрів необхідно впроваджувати заходи щодо деескалації пилоутворення (дрібнодисперсного пилу активованого вугілля) та підтримувати проектну потужність загальнообмінної та місцевої припливно-витяжної вентиляції у виробничих залах [25].

Гетерогенно-каталітичні реактори функціонують в умовах значного теплового форсування, що висуває жорсткі вимоги до дотримання протипожежного режиму та використання високоякісної термоізоляції корпусного обладнання для запобігання термічним опікам. Особливий акцент ставиться на безперебійному моніторингу температурних кривих і перевірці метрологічної адекватності та справності елементів автоматизованого контрольно-вимірювального інструментарію (КВПіА)

Обов'язковою передумовою допуску інженерно-технічного персоналу до обслуговування пилוגазоочисного інструментарію є проходження регламентованої системи навчання. Вона охоплює вхідні, планові та позачергові інструктажі з техніки безпеки, опанування навичок безаварійного керування агрегатами, а також регулярні медичні огляди згідно з чинними нормативно-правовими актами [25].

Створення умов для безаварійної експлуатації газоочисних комплексів є базовим елементом менеджменту промислової безпеки на сучасному підприємстві. Специфіка поводження з цим типом обладнання пов'язана з обігом хімічно агресивних субстанцій, високими температурними режимами, наявністю силових електромереж та розгалужених магістралей для транспортування газових флюїдів. Це вимагає жорсткої виконавчої дисципліни щодо дотримання галузевих стандартів охорони праці [10, 25].

У процесі моніторингу абсорбційного устаткування існує висока ймовірність безпосереднього контакту операторів із їдкими лужними або кислотними реагентами, що виступають як сорбційне середовище. Розгерметизація сполучних вузлів апаратів або ігнорування правил безпеки загрожує персоналу глибокими хімічними опіками епітелію та пошкодженням слизових оболонок. Для запобігання подібним виробничим ексцесам робочі місця забезпечуються спеціальним прогумованим одягом,

хімічно стійкими рукавицями, захисними масками й окулярами, а також ЗІЗ органів дихання [10].

Підвищеного контролю вимагає технічний стан циркуляційної інфраструктури: насосних агрегатів, запірно-регулювальної арматури, магістральних трубопроводів та резервуарів для накопичення робочих розчинів. Систематичне проведення дефектовки, ревізій та планово-попереджувальних ремонтів (ППР) дозволяє виявляти приховані втомні або корозійні руйнування металу і запобігати масштабним інженерним аваріям. Усі сервісні маніпуляції виконуються виключно відповідно до затверджених інструкцій та операційних регламентів підприємства [5].

Під час експлуатації адсорбційних фільтрів головними джерелами небезпеки є інтенсивне виділення дрібнодисперсного вугільного пилу, ризики локального самозаймання сорбційних матеріалів, а також специфіка робіт із перевантаження й термічного відновлення насадок. Особливу пильність слід проявляти при використанні активованого вугілля, схильного до самонагрівання через високий екзотермічний ефект адсорбції окремих сполук. Мінімізація пожежних ризиків досягається безперервною реєстрацією температурного профілю сорбційного шару та суворим дотриманням технологічних параметрів [5].

Функціонування гетерогенно-каталітичних реакторів відбувається за умов значного теплового форсування. Цей чинник зумовлює високу ймовірність отримання персоналом термічних опіків під час виконання сервісних робіт. З метою оптимізації умов праці всі високотемпературні корпуси та газоходи захищають шаром теплоізоляції, а будь-які ремонтні або профілактичні операції дозволяється проводити лише після повної температурної релаксації (охолодження) конструкцій та їхнього гарантованого видимого відключення від енергомереж [18, 17].

Невід'ємною ланкою загальної системи безпеки є організація перманентного лабораторного та автоматичного контролю параметрів

повітряного середовища робочої зони. На виробничих ділянках має здійснюватися систематичний інструментальний моніторинг концентрацій шкідливих газів, а також фіксація показників мікроклімату (температури, вологості, швидкості руху повітря). У разі детектування перевищень встановлених рівнів ГДК персонал зобов'язаний негайно задіяти системи аварійної вентиляції, локалізувати джерело витoku та застосувати шлангові чи ізолюючі протигази [24, 32].

Рівень кваліфікації та професійної підготовки працівників безпосередньо корелює з індексами травматизму. Реалізація трирівневої системи інструктажів (первинного на робочому місці, планового повторного та позапланового при зміні технології), а також тренінги з безаварійної експлуатації установок дозволяють виробити у персоналу чіткі практичні навички дій в екстремальних умовах [10].

В основі сучасного європейського підходу до організації безпеки праці лежить концепція профілактики та випереджального купірування ризиків. На цьому підґрунті на підприємствах розгортаються процедури системного аудиту небезпек, матричного оцінювання професійних ризиків та розроблення превентивних інженерних заходів. Такий формат управління відповідає міжнародним стандартам (зокрема ISO 45001) та суттєво підвищує загальну надійність виробничих систем [30, 31].

Окреме значення має ступінь готовності об'єкта до ліквідації можливих аварійних ситуацій. На підприємстві розробляються та щорічно коригуються плани локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і дій (ПЛАС), призначаються керівники аварійних робіт та формуються операційні запаси засобів екстреного реагування. Регулярне проведення тактико-спеціальних тренувань та навчальних тривог дозволяє довести дії персоналу при надзвичайних подіях до автоматизму [10, 5].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що забезпечення умов для безпечного функціонування фізико-хімічних комплексів газоочищення

вимагає реалізації інтегрованого підходу, який поєднує в собі інженерно-технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні рішення. Системне виконання інструкцій з охорони праці не лише гарантує збереження життя і здоров'я працівників, а й підвищує експлуатаційну надійність обладнання та стабільність роботи всього природоохоронного комплексу підприємства [10, 25].

Зведений матричний перелік ключових небезпечних і шкідливих виробничих чинників, а також комплекс технічних і організаційних заходів щодо їх упередження під час експлуатації газоочисних систем представлено в таблиці 4.2.

Небезпечний фактор	Можливі наслідки	Заходи безпеки
Контакт з реагентами	Хімічні опіки	ЗІЗ, герметизація обладнання
Висока температура	Термічні опіки	Теплоізоляція, захисні екрани
Пил сорбентів	Подразнення органів дихання	Респіратори, вентиляція
Витік газів	Отруєння персоналу	Газоаналізатори, контроль герметичності
Електрообладнання	Ураження струмом	Заземлення, технічний контроль
Аварійні ситуації	Травматизм	ПЛАС, інструктажі та тренування

Таблиця 4.2 – Небезпечні виробничі фактори під час експлуатації газоочисних установок та заходи безпеки

Як видно з таблиці 4.2, більшість виробничих ризиків може бути ефективно мінімізована шляхом поєднання технічних засобів захисту,

організаційних заходів та використання засобів індивідуального захисту. Це дозволяє забезпечити належний рівень безпеки праці під час експлуатації газоочисних установок [10, 5].

З метою підтримання належного рівня промислової безпеки при поводженні з газоочисною інфраструктурою виробничі цехи та ділянки в обов'язковому порядку оснащуються автоматизованими системами припливно-витяжної вентиляції, контурами протиаварійного захисту (ПАЗ) для миттєвого знеструмлення агрегатів, а також первинними й автоматичними засобами пожежогасіння та сповіщення про надзвичайні ситуації. У зонах із підвищеною ймовірністю виникнення локальних витоків або емісій токсикантів доцільно монтувати стаціонарні автоматичні газоаналізатори, інтегровані в єдину мережу оперативного моніторингу та сигналізації стану робочої зони [13, 23, 25].

Таким чином, неухильне виконання регламентів охорони праці, виробничої санітарії та техніки безпеки в процесі управління фізико-хімічними комплексами газоочищення є надійним інструментом деескалації професійних ризиків. Це дозволяє сформувати комфортне й безпечне робоче середовище для експлуатаційного персоналу та суттєво підвищити загальний коефіцієнт експлуатаційної надійності екозахисної апаратури.

ВИСНОВОК

У бакалаврській роботі я виконав оцінку ефективності фізико-хімічних методів очищення повітря від токсичних газів у промислових зонах та обґрунтував доцільність їх застосування для зниження негативного впливу промислових викидів на навколишнє середовище.

У першому розділі провів аналіз наукової літератури та нормативно-правової бази у сфері охорони атмосферного повітря. Визначив основні джерела утворення токсичних газових викидів у промислових зонах, охарактеризував їх вплив на довкілля та здоров'я населення. Розглянув фізико-хімічні основи абсорбційних, адсорбційних і каталітичних методів очищення газових викидів, встановлено їх переваги, недоліки та сфери практичного застосування.

У другому розділі навів характеристику об'єкта дослідження – типової промислової зони з підвищеним рівнем техногенного навантаження. Розглянув методики відбору проб атмосферного повітря та інструментального визначення концентрацій токсичних речовин. Також проаналізував основні критерії оцінки ефективності роботи газоочисних установок, які стали основою для проведення подальших досліджень.

У третьому розділі виконав оцінку ефективності фізико-хімічних методів очищення повітря на основі результатів власних досліджень. Встановив, що абсорбційне очищення забезпечує зниження концентрації діоксиду сульфуру з ефективністю 93,5 %, адсорбційне очищення летких органічних сполук – 94,4 %, а каталітичне очищення оксиду карбону – 98,0 %. Провів порівняльний аналіз який показав, що найбільш ефективним є каталітичний метод, однак для досягнення максимального результату доцільно застосовувати комбіновану технологічну схему, яка поєднує кілька способів очищення.

У четвертому розділі провів розрахунок еколого-економічної ефективності впровадження запропонованої системи очищення. Встановив,

що застосування комбінованої схеми дозволяє скоротити обсяги викидів забруднюючих речовин на 117 т/рік та забезпечити суттєве зменшення екологічного навантаження на атмосферне повітря. Крім того, розглянув основні вимоги охорони праці та техніки безпеки під час експлуатації газоочисного обладнання, дотримання яких є необхідною умовою безпечної роботи персоналу.

За результатами проведеного дослідження встановив, що фізико-хімічні методи очищення повітря є високоефективними засобами зменшення промислового забруднення атмосфери. Найбільш раціональним рішенням для сучасних підприємств є використання комбінованих систем газоочищення, які забезпечують високий ступінь вилучення токсичних речовин, сприяють виконанню екологічних нормативів та підвищують рівень екологічної безпеки промислових зон.

Таким чином, мету бакалаврської роботи досягнув, а поставлені завдання виконав в повному обсязі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Зеркалов Д. В. Екологічна безпека та охорона довкілля : монографія. Київ : Основа, 2019. 514 с.
2. Клименко М. О., Прищепя А. М. Техноекологія : підручник. Київ : Академія, 2020. 304 с.
3. Безпалько В. Л. Промислова екологія : навчальний посібник. Харків : ХНУМГ, 2018. 256 с.
4. Войцицький А.П. Екологія атмосфери. – Київ: Аграрна освіта, 2020.
5. Запорожець О.І. Атмосфероохоронні технології та процеси. – Київ: НАУ, 2021.
6. Степанов О. В. Основи екології та охорони навколишнього середовища. Київ : Либідь, 2018. 224 с.
7. Технології захисту атмосферного повітря: навчальний посібник / За ред. В.М. Боголюбова. – Київ, 2022.
8. Дудніков А. А. Очищення промислових газових викидів : навчальний посібник. Дніпро : НГУ, 2017. 198 с.
9. Бистряков І. К. Екологічне право України : навчальний посібник. Київ : Центр учбової літератури, 2021. 312 с.
10. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» № 2707-ХІІ від 16.10.1992 р.
11. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць. Київ : МОЗ України, 2019.
12. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on industrial emissions. Brussels, 2010.

13. Екологічний контроль та моніторинг довкілля : навчальний посібник / за ред. В. М. Боголюбова. Київ : НУБіП України, 2020. 286 с.
14. Ратушняк Г. С. Інженерна екологія : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2019. 230 с.
15. Мальований М.С. Техноекологія. – Львів: Львівська політехніка, 2022.
16. Бондар О.І. Промислова екологія. – Київ: ДЕА, 2021.
17. Степаненко О. М. Технології очищення газових викидів : навчальний посібник. Київ : Каравела, 2020. 280 с.
18. Мальований М.С. Техноекологія. – Львів: Львівська політехніка, 2022.
19. Кучерявий В. П. Екологія : підручник. Львів : Світ, 2019. 520 с.
20. Сафранов Т. А. Екологічні основи природокористування : навчальний посібник. Львів : Новий Світ-2000, 2018. 248 с.
21. Гігієна атмосферного повітря : навчальний посібник / за ред. Ю. І. Кундієва. Київ : Здоров'я, 2017. 400 с.
22. ДСТУ ISO 4225:2001. Якість повітря. Загальні положення. Київ : Держстандарт України, 2001.
23. Запорожець О. І. Контроль та моніторинг забруднення атмосфери : навчальний посібник. Київ : НАУ, 2020. 212 с.
24. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища : навчальний посібник / за ред. О. М. Адаменка. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2018. 352 с.

25. Бахарєв В. С. Основи технічної екології : навчальний посібник. Харків : ХНАДУ, 2019. 268 с.
26. Черниченко І. О., Бабій В. Ф., Литвиченко О. М., Кондратенко О. Є. Методичні рекомендації «Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря». Київ : МОЗ України, 2023.
27. ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзєєва НАМН України». Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я людини. Київ, 2020.
28. Державна установа «Центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України». Небезпечний вплив забрудненого атмосферного повітря на здоров'я населення. 2025.
29. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector (WGC BREF). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. 1048 p.
30. Integrated Pollution Prevention and Control: Reference Document on Best Available Techniques. European Commission. Brussels, 2021. 620 p.
31. Угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом. Розділ V «Економічне та галузеве співробітництво». Київ, 2024.
32. Методичні рекомендації щодо створення та функціонування систем моніторингу атмосферного повітря

- в Україні. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023. 84 с.
33. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2023 році. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2024. 412 с.
34. Бондар О.І. Промислова екологія. – Київ: ДЕА, 2021.
35. Запорожець О.І. Екологія енергетики. – Київ: Центр учбової літератури, 2020.
36. Кучерявий В.П. Екологія. – Львів: Світ, 2021.
37. Войцицький А.П. Екологія атмосфери. – Київ: Аграрна освіта, 2020.
38. Клименко М.О. Моніторинг довкілля. – Рівне: НУВГП, 2021.
39. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища України, 2024.
40. Запольський А.К. Водна екологія. – Київ: Вища школа, 2020.
41. Фурдичко О.І. Агроекологія. – Київ: Аграрна наука, 2021.
42. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Стан атмосферного повітря в Україні. – Київ, 2024.
43. Сніжко С.І. Метеорологія і кліматологія. – Київ: Ніка-Центр, 2020.

44. Запорожець О.І. Атмосфероохоронні технології та процеси.
– Київ: НАУ, 2021.
45. Клименко М.О. Моніторинг довкілля. – Рівне: НУВГП,
2021.
46. Кучерявий В.П. Загальна екологія. – Львів: Світ, 2021.
47. Гутаревич Ю.Ф. Урбоекологія. – Київ: НАУ, 2020.
48. Методичні рекомендації з моделювання розсіювання
забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.
Міністерство захисту довкілля України, 2023.