

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Факультет інженерних систем та екології

Кафедра технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

На тему:

«Технології захисту навколишнього середовища в промисловості»»

Берловська Катерина Іванівна

Київ 2025р

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет інженерних систем та екології

Кафедра технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЗНС та ОП

Ткаченко Т.М. _____

„___” _____ 2025 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО РІВНЯ МАГІСТР
«Технології захисту навколишнього середовища в промисловості»**

Виконала студентка групи ТЗНСм -24

Берловська Катерина Іванівна

Спеціальність: 183 «Технології

захисту навколишнього середовища»

Керівник: к.т.н., доц. Василенко Л.О.

Рецензент: _____

Київ 2025р

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Факультет інженерних систем та екології

Кафедра технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність: 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЗНС та ОП

Ткаченко Т.М. _____

„___” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

1.Тема роботи: Технології захисту навколишнього середовища в промисловості
керівник роботи: к.т.н., доц. Василенко Л.О.

затверджена наказом вищого навчального закладу від «___» _____
2025 р. № _____

2.Строк подання студентом роботи «5» грудня 2025 р.

3.Вихідні дані до роботи взяті з відкритих джерел підприємства

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; Теоретичні основи захисту навколишнього середовища у промисловості; Аналіз технологій захисту навколишнього середовища на прикладі промислового підприємства; Удосконалення технологій захисту навколишнього середовища; Висновки

5. Перелік графічного матеріалу а) Таблиці 3 б) Малюнки 10

6. Календарний план виконання роботи:

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Теоретичні основи захисту навколишнього середовища у промисловості	Вересень	виконано
2	Аналіз технологій захисту навколишнього середовища на прикладі промислового підприємства	Жовтень	виконано
3	Удосконалення технологій захисту навколишнього середовища	Листопад	виконано
4	Висновки	Листопад	виконано
5	Список використаної літератури	Листопад	виконано
6	Остаточне оформлення роботи	Листопад	виконано
7	Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	Листопад	виконано
8	Попередній захист роботи на кафедрі	Листопад	виконано

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		Дата	Підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			

8. Дата видачі завдання _____

Зав. кафедри

_____ (підпис)

Ткаченко Т.М.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник

_____ (підпис)

Василенко Л.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Студент

_____ (підпис)

Берловська К.І.

_____ (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

	Вступ	6
Розділ 1.	Теоретичні основи захисту навколишнього середовища у промисловості	8
1.1.	Екологічні проблеми, спричинені промисловістю	8
1.2.	Нормативно-правове регулювання екологічної безпеки	19
1.3.	Сучасні технології захисту довкілля в промисловості	32
Розділ 2.	Аналіз технологій захисту навколишнього середовища на прикладі промислового підприємства	57
2.1.	Загальна характеристика підприємства	57
2.2.	Ідентифікація екологічних ризиків підприємства	65
2.3.	Аналіз діючих природоохоронних технологій на підприємстві	78
Розділ 3.	Удосконалення технологій захисту навколишнього середовища ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»	89
3.1.	Основні проблеми функціонування діючих систем екологічного захисту	89
3.2.	Удосконалення природоохоронних технологій на підприємстві	95
3.3.	Екологічна та економічна оцінка запропонованих заходів	103
	Висновки	112
	Список використаної літератури	115

Вступ

Актуальність теми

Сучасний розвиток промисловості є основою економічного зростання та технологічного прогресу, проте водночас він супроводжується значним антропогенним навантаженням на навколишнє середовище. Інтенсивність промислових процесів призводить до забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів і ґрунтів, утворення великих обсягів відходів та зростання ризиків для екосистем і здоров'я населення. У цих умовах впровадження ефективних технологій захисту довкілля стає визначальним чинником сталого розвитку, глобальної екологічної безпеки та відповідності міжнародним стандартам.

Проблематика охорони навколишнього середовища є однією з ключових у світовій політиці, а європейський курс України зумовлює необхідність модернізації промисловості згідно з екологічними директивами ЄС та принципами циркулярної економіки. Особливої актуальності набуває впровадження інноваційних технологій у сферах очищення повітря, водопідготовки, утилізації відходів, моніторингу викидів і ресурсозбереження. Такі технології є не лише механізмом зниження негативного впливу на довкілля, але й інструментом підвищення конкурентоспроможності підприємств, оптимізації виробничих процесів і формування сучасних екологічно орієнтованих моделей управління.

Метою даної магістерської роботи є дослідження сучасних технологій захисту навколишнього середовища в промисловості та обґрунтування шляхів підвищення їх ефективності на основі аналізу існуючих рішень та розробки пропозицій щодо їх удосконалення.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати основні види промислових впливів на довкілля та пов'язані з ними екологічні проблеми;
- розглянути нормативно-правову базу, що регулює екологічну безпеку промисловості;
- узагальнити та класифікувати сучасні технології захисту навколишнього середовища, які застосовуються у промислових галузях;
- провести аналіз екологічного стану та природоохоронних технологій конкретного промислового підприємства;
- визначити проблеми та недоліки чинних технологічних рішень;
- запропонувати та обґрунтувати заходи щодо вдосконалення системи екологічного захисту;
- оцінити екологічну та економічну ефективність запропонованих удосконалень.

Об'єктом дослідження є технології захисту навколишнього середовища в промисловості, а предметом — методи, технічні рішення та організаційні підходи, що забезпечують мінімізацію негативного впливу промислових підприємств на довкілля.

Методами дослідження є аналіз наукових джерел і нормативних документів, методи системного підходу, порівняльний аналіз технологій, еколого-економічні методи оцінювання, а також методи прикладного аналізу промислових процесів.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до оцінювання ефективності природоохоронних технологій, а також у розробці практичних рекомендацій щодо модернізації екологічних систем на промислових підприємствах з урахуванням сучасних стандартів екологічної безпеки.

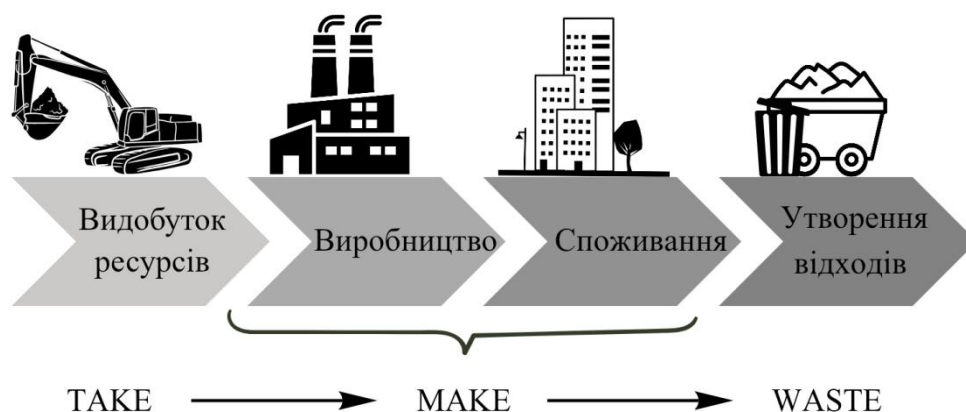
Практичне значення роботи полягає в можливості використання запропонованих рішень для удосконалення систем очищення, зниження техногенного навантаження та підвищення екологічної відповідальності промислових підприємств.

Структура роботи складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку джерел та додатків. У першому розділі викладено теоретичні засади та сучасні технології екологічного захисту. У другому — проведено аналіз технологій на прикладі промислового підприємства. У третьому — наведено пропозиції щодо вдосконалення існуючих технологій та обґрунтовано їх ефективність.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА У ПРОМИСЛОВОСТІ

1.1. Екологічні проблеми, спричинені промисловістю

Промисловий сектор є одним з ключових чинників економічного розвитку держави, проте його функціонування супроводжується значним антропогенним впливом на природне середовище. Більшість виробничих процесів передбачає використання енергоресурсів, хімічних речовин, мінеральної сировини та води, що зумовлює утворення викидів, стічних вод і промислових відходів. Традиційна модель господарювання, що домінувала протягом десятиліть, характеризувалася лінійною логікою: *«видобуток ресурсів – виробництво – споживання – утворення відходів»*. [1;2]



Такий підхід вже не відповідає сучасним екологічним викликам, призводячи до деградації природних екосистем, вичерпання ресурсів та зміни клімату. У сукупності ці фактори формують комплекс екологічних проблем, масштаби та інтенсивність яких зростають відповідно до темпів розвитку промисловості.

1.1.1. Екологічні наслідки діяльності промисловості

Однією з найсерйозніших проблем є забруднення атмосферного повітря. Промислові підприємства, зокрема металургійні, хімічні, енергетичні та нафтопереробні, є основними джерелами викидів пилу, оксидів сірки(SO_2) та азоту(NO_x), твердих часток (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), летких органічних сполук, важких металів та інших токсичних компонентів. [3] Потрапляючи у повітря, ці речовини спричиняють кислотні дощі, утворення смогу, деградацію рослинності, погіршення стану здоров'я населення та глобальні кліматичні зміни. [4] Особливу небезпеку становлять дрібнодисперсні частинки $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} , здатні проникати в легені й кровоносну систему людини.

В Україні понад 60% усіх стаціонарних викидів припадає на металургію, енергетику та хімічну промисловість. [3] Зокрема, підприємства Дніпропетровської, Донецької та Запорізької областей традиційно формують найбільше техногенне навантаження на атмосферу.

Не менш актуальною є проблема забруднення водних ресурсів, яке виникає внаслідок скидів недостатньо очищених або повністю неочищених стічних вод. Хімічна, харчова, текстильна, целюлозно-паперова та гірничодобувна промисловість продукують стоки, що містять органічні речовини, нафтопродукти, феноли, хлориди, важкі метали (нікель, кадмій, свинець), мікробіологічні забруднювачі поверхнево-активні речовини та інші токсиканти. [5] Близько 25–30% поверхневих вод України не відповідає нормативам екологічного стану саме через промислові скиди.

[6] Потрапляючи у водойми, такі скиди порушують водні екосистеми,

спричиняють евтрофікацію, загибель риб та інших гідробіонтів, а також становлять загрозу для якості питної води.

Серйозним екологічним викликом є також забруднення ґрунтів, що пов'язане з неконтрольованими викидами, аварійними ситуаціями, неправильним зберіганням промислових відходів і застосуванням застарілих технологічних процесів. Промисловість залишається найбільшим генератором відходів: гірничо-металургійний комплекс дає понад 70% усіх промислових відходів. [7;8] У ґрунт потрапляють нафтопродукти, важкі метали, токсичні солі, радіонукліди, що призводить до деградації земель, втрати родючості та небезпеки вторинного забруднення водних і повітряних ресурсів. Україна має значну кількість накопичених відходів — понад 10 млрд тонн. Забруднені ґрунти стають джерелом довготривалої екологічної небезпеки, оскільки більшість токсичних речовин зберігається в них десятиліттями.

Окремої уваги потребує проблема утворення та накопичення промислових відходів. Металургія, машинобудування, хімічна промисловість та інші виробництва генерують великі обсяги твердих відходів: шлаків, шламів, золи, будівельних та технологічних відходів. Значна частина з них має токсичні властивості або містить важкі метали, а відсутність належної інфраструктури переробки та утилізації призводить до формування шламонакопичувачів, полігонів та відвалів, що становлять постійну небезпеку для довкілля та населення. [9] Утилізація таких відходів є складною і потребує застосування спеціалізованих технологій.

Суттєвим екологічним наслідком промислової діяльності є високе споживання енергоресурсів та природних ресурсів, що спричиняє виснаження водних, мінеральних і біологічних запасів. Деякі промислові галузі, наприклад металургія чи цементне виробництво, є одними з найбільших споживачів енергії, що посилює викиди парникових газів і сприяє глобальному потеплінню. Енергетика та металургія забезпечують до **60% загальних викидів CO₂ в Україні**, що створює складнощі у

виконанні зобов'язань у рамках Європейського зеленого курсу та Паризької угоди. [10;11]

Але все ж таки значна частина промисловості пов'язана з ризиками аварійних та надзвичайних ситуацій. Хімічні викиди, вибухи, пожежі, прориви дамб та інші техногенні аварії можуть спричиняти масштабні екологічні катастрофи, наслідки яких тривають десятиліттями. [12]

Таким чином, промисловість формує широкий спектр екологічних проблем, що охоплюють повітряне, водне, ґрунтове середовище, відходи, ресурси та безпеку. Зростаючий масштаб цих проблем потребує впровадження сучасних технологій екологічного захисту, посилення контролю за виробничими процесами, переходу до ресурсоефективних моделей та гармонізації з міжнародними екологічними стандартами. Це обумовлює необхідність системного підходу до екологічної модернізації промисловості, що розглядатиметься в наступних підрозділах дослідження

1.1.2. Лінійна модель економіки та її вразливість

Традиційна лінійна модель економічного розвитку, що характеризується послідовністю етапів «take →make →waste », протягом тривалого часу залишалася домінуючою у промисловості більшості країн світу, у тому числі й України. За даними Європейського агентства з питань довкілля, лінійна модель є одним із ключових чинників перевищення планетарних меж щодо використання природних ресурсів та формування надмірних обсягів відходів і викидів парникових газів [13].

Основною особливістю лінійної моделі є висока матеріаломісткість та енергомісткість виробничих процесів, що зумовлює інтенсивний видобуток природних ресурсів та значні втрати матеріалів на всіх етапах життєвого циклу продукції. Виробничі залишки та відходи здебільшого не повертаються у повторний технологічний цикл, що спричиняє накопичення техногенних

масивів, погіршення стану атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод та деградацію земельних ресурсів [14].

Для української промисловості вразливість лінійної моделі посилюється низкою структурних чинників. Значна частина виробництв функціонує на основі морально та фізично застарілих технологій, що мають низький рівень енергоефективності та високий рівень утворення відходів. За даними Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища, промисловість України є одним із найбільших джерел викидів забруднюючих речовин в атмосферу, а обсяги накопичених промислових відходів перевищують 10 млрд тонн [15]. Проблеми посилюються недостатнім рівнем переробки вторинних матеріальних ресурсів і високою залежністю промислових підприємств від первинної сировини [16].

Економічна неефективність лінійної моделі проявляється також у високих витратах підприємств на захоронення відходів, втраті потенційної вторинної сировини та невідповідності екологічним вимогам Європейського Союзу. У контексті євроінтеграційних процесів та імплементації Директиви 2008/98/ЕС, положення Закону України «Про управління відходами» (2022 р.) [17] прямо орієнтують промисловість на поступову відмову від лінійної логіки виробництва.

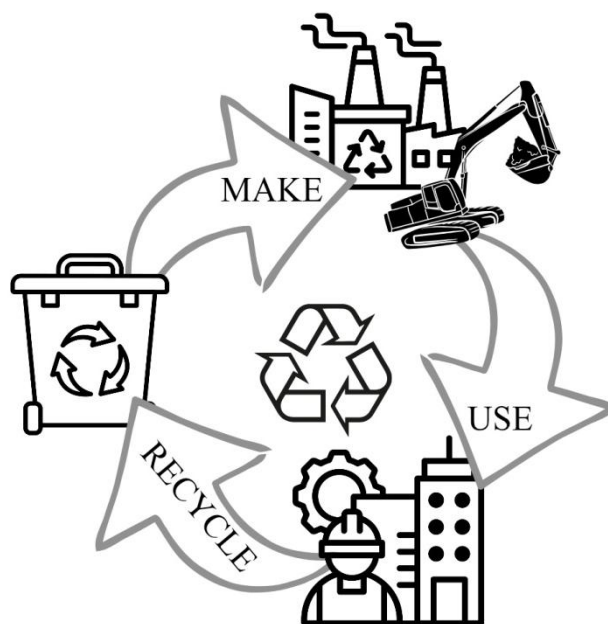
Таким чином, лінійна модель економіки є системно вразливою як з екологічної, так і з економічної точки зору, що зумовлює необхідність переходу до моделей циркулярної економіки. Такий перехід дозволяє мінімізувати утворення відходів, підвищити ефективність використання ресурсів та модернізувати промислові підприємства відповідно до сучасних європейських екологічних стандартів

1.1.3. Циркулярна економіка як відповідь на екологічні виклики

Сучасні екологічні проблеми, спричинені індустріальним розвитком, актуалізують необхідність переходу від традиційної лінійної моделі

господарювання до принципово нових підходів, орієнтованих на підвищення ресурсоефективності та мінімізацію негативного впливу на довкілля. Одним із таких підходів є концепція циркулярної економіки (ЦЕ), яка передбачає збереження цінності ресурсів у виробничому циклі якомога довше, запобігання утворенню відходів та максимальне повторне використання матеріалів [14].

На відміну від лінійної економіки, що функціонує за принципом *«видобуток ресурсів – виробництво – споживання – утворення відходів»*, циркулярна модель ґрунтується на замкнених матеріальних та енергетичних потоках, де продукти, матеріали та відходи розглядаються як ресурси, здатні до повторного залучення у виробництво [18].



Основні принципи ЦЕ:

- Проектування без відходів (design out waste)
- Подовження життєвого циклу продукту
- Переробка матеріалів та їх повторне використання
- Використання відновлюваної енергії

- Перехід від власності до сервісних моделей

Такий підхід дозволяє одночасно зменшити екологічний тиск на природні системи, оптимізувати витрати підприємств та підвищити їхню конкурентоспроможність на глобальному ринку.

Одним із ключових інструментів реалізації концепції циркулярної економіки у промисловому секторі є промисловий симбіоз (Industrial Symbiosis). Його суть полягає у формуванні міжгалузевих коопераційних ланцюгів, у межах яких відходи або побічні продукти одного підприємства використовуються як сировина, енергія чи матеріали іншого [19]. Типовими прикладами є використання металургійних шлаків у цементному виробництві, повторне використання промислового тепла для опалення, переробка органічних залишків у біогазових комплексах тощо. За даними досліджень Європейського інституту інновацій та технологій, впровадження промислового симбіозу дозволяє зменшити утворення відходів до 30–60% та скоротити споживання первинних ресурсів у середньому на 20–50% [20].

В Україні розвиток циркулярної економіки визначено стратегічним напрямом екологічної модернізації промисловості. Прийняття Закону України «Про управління відходами» у 2022 р. започаткувало перехід до нової системи поводження з відходами, що відповідає вимогам ЄС та передбачає ієрархію поводження з відходами, розширену відповідальність виробника та розвиток ринку вторинної сировини [17]. Додатково, План заходів з впровадження Національної стратегії управління відходами до 2030 року містить положення щодо стимулювання промислових підприємств до повторного використання матеріальних потоків, удосконалення технологій переробки та мінімізації утворення відходів [21].

У контексті євроінтеграційних процесів Україна орієнтується на принципи Європейського зеленого курсу, зокрема Європейського пакету дій з циркулярної економіки (CEAP), який передбачає підвищення ефективності

використання ресурсів у промисловості, розвиток сталого дизайну продукції, екологічні стандарти виробництва та зниження промислових викидів [18; 22].

Таким чином, циркулярна економіка виступає концептуальною основою екологічної модернізації промисловості та забезпечує інтегроване вирішення проблем, пов'язаних із забрудненням довкілля, виснаженням ресурсів та накопиченням відходів. Запровадження принципів ЦЕ створює підґрунтя для формування стійких промислових екосистем та переходу України до моделі сталого розвитку.

1.1.4. Промисловий симбіоз як практичний інструмент циркулярної економіки

Промисловий симбіоз розглядається як одна з ключових практичних технологій реалізації циркулярної економіки на рівні промислових підприємств і територіально-виробничих комплексів. Його сутність полягає у створенні системи взаємовигідних зв'язків між підприємствами, у межах яких відходи, побічні продукти або надлишкові енергетичні ресурси одного виробника можуть бути використані як повноцінні ресурси для іншого [19].

Це дозволяє:

- зменшувати обсяги відходів та сировинні витрати;
- знижувати витрати на утилізацію;
- підвищувати енергоефективність;
- формувати локальні кластери сталого розвитку.

Такий підхід формує замкнені матеріальні потоки, мінімізує обсяги утворення відходів, знижує екологічне навантаження на довкілля та підвищує загальну ефективність виробництва.

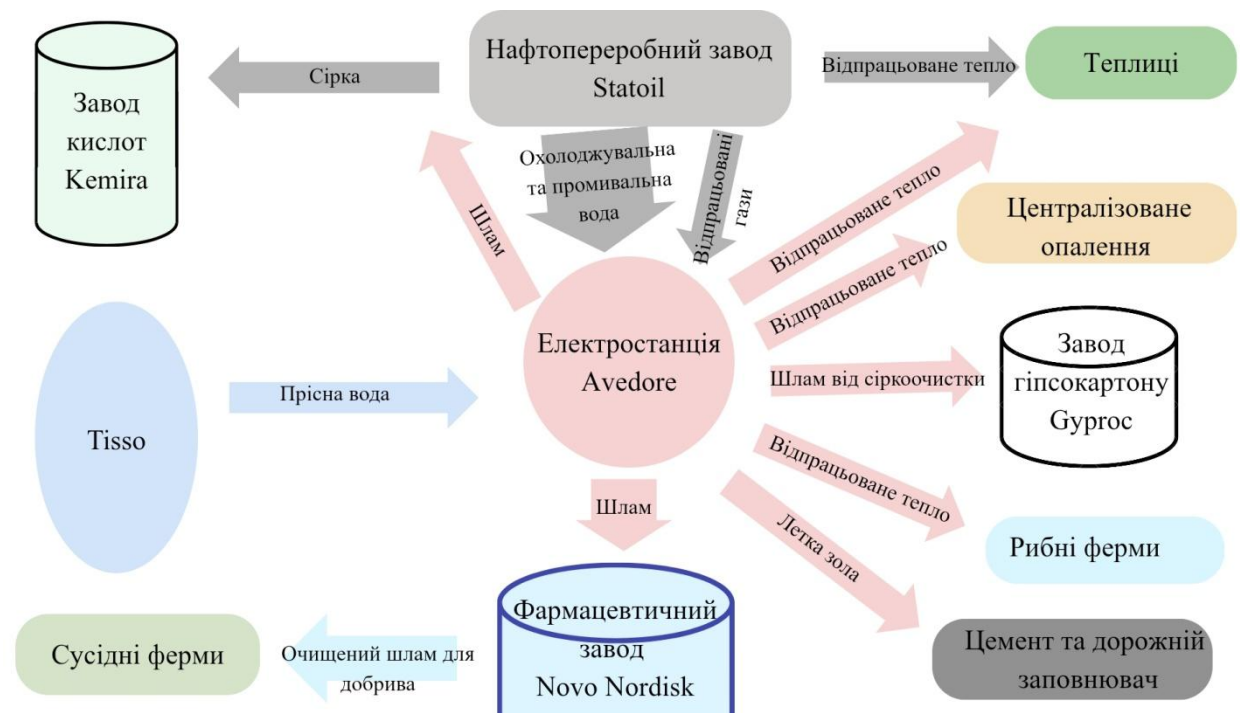
Концепція промислового симбіозу ґрунтується на кількох базових принципах: сумісності матеріальних та енергетичних потоків, просторовій близькості підприємств, технологічній взаємодоповнюваності, а також економічній доцільності обміну ресурсами [23]. Важливим елементом є розвиток

інфраструктури, що забезпечує транспортування матеріальних потоків, а також координаційні механізми між підприємствами та органами місцевого самоврядування.

У світовій практиці промисловий симбіоз продемонстрував високу ефективність, особливо у скандинавських країнах, Нідерландах та Японії. Найвідомішим прикладом є індустріальний парк Калундборг (Данія),



де сформована мережа з понад десяти підприємств забезпечує взаємообмін тепловою енергією, водою, газами, шлаками, гіпсом та іншими побічними продуктами. Реалізація моделі дозволила зменшити споживання природних ресурсів на 30%, скоротити викиди CO₂ на понад 240 тис. тонн щорічно та істотно знизити витрати підприємств на утилізацію відходів [24].



Екологічний промисловий симбіоз індустриального парку Калунборг (Данія)

Досвід країн ЄС підтверджує, що впровадження промислового симбіозу сприяє формуванню регіональних «еко-промислових кластерів», орієнтованих на циркулярні моделі виробництва. За оцінками Європейського інституту інновацій та технологій, промисловий симбіоз забезпечує скорочення обсягів утворення відходів на 40–70%, зниження енергоспоживання на 15–25% та економію виробничих витрат у межах 5–20% залежно від характеру ресурсних потоків [20].

В Україні можливості розвитку промислового симбіозу визначаються змінами нормативно-правової бази, зокрема переходом до нової системи управління відходами відповідно до європейських підходів. Закон України «Про управління відходами» та Національна стратегія управління відходами до 2030 року передбачають стимули для повторного використання матеріальних потоків, розвиток ринку вторинної сировини та створення передумов для формування промислових екосистем, у яких відходи розглядаються як ресурси [17; 21]. Потенціал промислового симбіозу є значним у таких галузях, як металургія (використання шлаків у будівельній галузі), цементна

промисловість(спалювання відходів як альтернативного палива), агропереробка, хімічна та енергетична промисловість.

Промисловий симбіоз виступає не лише екологічною, а й економічною моделлю, яка дає можливість підприємствам зменшувати витрати, підвищувати ефективність використання ресурсів та формувати нові ринки матеріалів і технологій. Таким чином, він є важливим інструментом реалізації циркулярної економіки, сприяє зниженню техногенного навантаження та створює передумови для сталого розвитку промислових регіонів України.

Підсумовуючи підрозділ можна сказати, що промисловість є одним із ключових джерел антропогенного навантаження на довкілля, формуючи значні обсяги викидів забруднювальних речовин, промислових відходів і споживаючи суттєві обсяги природних ресурсів. Традиційна лінійна модель економічного розвитку, заснована на принципі *«видобуток ресурсів – виробництво – споживання – утворення відходів»*, в умовах обмеженості ресурсів і зростаючого техногенного тиску виявляється неефективною та екологічно вразливою. Її наслідками є виснаження природних запасів, накопичення відходів та збільшення обсягів викидів, що поглиблюють глобальні та локальні екологічні проблеми.

Натомість концепція циркулярної економіки пропонує системне вирішення зазначених викликів, орієнтуючись на збереження цінності матеріалів у виробничому циклі, мінімізацію утворення відходів та скорочення екологічного сліду промислових підприємств. Застосування інструментів циркулярної економіки, зокрема промислового симбіозу, дає змогу підвищити ресурсну ефективність, зменшити обсяги техногенного навантаження та оптимізувати виробничі ланцюги завдяки використанню побічних продуктів одних підприємств як ресурсів для інших.

Аналіз сучасного стану української промисловості свідчить, що найбільший екологічний тиск формують металургійна, хімічна та енергетична галузі, що

зумовлює актуальність впровадження циркулярних підходів у національну промислову політику. У контексті євроінтеграційного курсу України та імплементації нового законодавства у сфері управління відходами перехід до циркулярної моделі розвитку виступає не лише екологічною необхідністю, а й економічною можливістю для модернізації промислового сектору.

Отже, упровадження принципів циркулярної економіки та практик промислового симбіозу є ключовими чинниками формування сталого промислового розвитку та зниження екологічних ризиків, спричинених техногенною діяльністю.

1.2. Нормативно-правове регулювання екологічної безпеки

Ефективний захист навколишнього середовища в умовах інтенсивного розвитку промисловості неможливий без чітко сформованої системи нормативно-правового регулювання. Законодавча база визначає вимоги до екологічної безпеки, порядок здійснення контролю, відповідальність суб'єктів господарювання та засади впровадження природоохоронних технологій. Регулювання в Україні здійснюється на трьох рівнях: міжнародному, національному та галузевому, що забезпечує комплексний підхід до екологічної модернізації промисловості.

1.2.1. Міжнародні стандарти та регламенти

У контексті інтеграції України до європейського простору особливого значення набувають нормативи Європейського Союзу. Основним документом, що регулює промислові викиди, є Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди (IED), яка визначає вимоги щодо запобігання та зменшення забруднення за рахунок застосування найкращих доступних технологій (НДТМ / BAT). Ця директива встановлює комплексний підхід: підприємства повинні не лише дотримуватися граничних значень викидів, але й застосовувати технологічні рішення, які мінімізують вплив на довкілля у всіх сферах — повітрі, воді, відходах та енергоспоживанні.

Одним із найбільш важливих міжнародних інструментів екологічного регулювання є стандарти серії ISO 14000, що визначають вимоги до системи екологічного менеджменту підприємств. Зокрема ISO 14001:2015, який встановлює вимоги до планування, впровадження та моніторингу заходів щодо мінімізації негативного впливу виробничої діяльності на довкілля та забезпечення відповідності правовим нормам [26]. Впровадження цього стандарту сприяє раціональному використанню ресурсів, зменшенню викидів, підвищенню загального рівня екологічної відповідальності промислових підприємств, покращенню управління ризиками та впровадженню принципу постійного вдосконалення.

Важливими для промисловості є також міжнародні регламенти, що регулюють обіг хімічних речовин. Одним із ключових документів є Регламент REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), який встановлює вимоги до реєстрації, оцінювання та обмеження використання хімічних речовин у країнах Європейського Союзу [25]. Регламент реалізує принцип відповідальності виробника за безпечність хімічної продукції протягом усього її життєвого циклу, що стимулює модернізацію виробництв та впровадження більш екологічно безпечних технологій.

Особливу увагу в міжнародному екологічному регулюванні приділено контролю за стійкими органічними забруднювачами. Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі спрямована на поступове обмеження та заборону використання токсичних речовин, здатних до тривалого накопичення та транскордонного перенесення [27]. Виконання її вимог передбачає вдосконалення технологічних процесів, впровадження систем очищення та мінімізацію утворення небезпечних побічних продуктів.

У сфері техногенної безпеки важливе значення має Конвенція ЄЕК ООН про транскордонний вплив промислових аварій, яка передбачає створення систем оцінювання ризиків, аварійного планування та міжнародної взаємодії у разі

виникнення техногенних інцидентів [28]. Вона сприяє гармонізації підходів до управління промисловими ризиками та мінімізації наслідків аварій.

Загалом, міжнародні стандарти й регламенти формують основу сучасної екологічної політики, стимулюють технологічні інновації, підвищують вимоги до екологічної відповідальності промисловості та забезпечують інтеграцію України у світові екологічні процеси.

1.2.2. Інтеграція українського законодавства з IED і системою ВАТ/BREF

Процес європейської інтеграції України зумовлює необхідність комплексного реформування екологічної політики та адаптації національного законодавства до вимог Європейського Союзу. Центральне місце у сфері регулювання промислового забруднення займає Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди (Industrial Emissions Directive, IED), яка встановлює принципи інтегрованого підходу до запобігання та контролю забруднення довкілля [29].

На відміну від традиційної моделі окремих дозволів на викиди в повітря, скиди у водні об'єкти та утворення відходів, IED впроваджує систему інтегрованого дозволу (Integrated Permit). Цей дозвіл охоплює всі аспекти впливу підприємства на довкілля та ґрунтується на комплексній оцінці технологічних процесів, енергоефективності, утворення відходів, шуму та викидів у різні компоненти довкілля [29]. Такий підхід забезпечує узгодженість екологічних вимог, мінімізує дублювання процедур і стимулює підприємства до модернізації.

В Україні запровадження інтегрованого дозволу здійснюється відповідно до Закону України «Про запобігання, зменшення та контроль промислового забруднення» (2022 р.), що наближує національну систему регулювання до

європейської моделі та передбачає перехід підприємств до інтегрованої дозвільної процедури з 2024–2030 рр. [30].

Ключовим елементом IED є застосування Найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ / Best Available Techniques, BAT). BAT — це технології, що довели свою ефективність у зменшенні промислових викидів та оптимізації ресурсокористування. Для їх впровадження Європейським бюро IPPC розроблено галузеві довідники BREF (Best Available Techniques Reference Documents), які містять технічні вимоги, граничні значення викидів та рекомендації щодо оптимізації виробничих процесів [31].

Україна з 2017 року офіційно розпочала інтегрувати свої нормативи із BREF у межах Угоди про асоціацію з ЄС. Затверджено перші національні довідники НДТМ для галузей: видобуток вугілля, виробництво сталі, цементу та енергетика. Робота здійснюється за участі Міндовкілля, промислових асоціацій та наукових установ [30].

Застосування НДТМ передбачає:

- використання технологічних рішень із мінімальним рівнем шкідливих викидів;
- підвищення енергоефективності виробництва;
- скорочення утворення небезпечних відходів;
- комплексний моніторинг параметрів технологічних процесів;
- відповідність граничним значенням викидів (BAT-AELs), встановлених у BREF.

Гармонізація з IED потребує трансформації системи державного управління. Україна створює: Для того щоб відповідати європейським вимогам щодо відкритості екологічної інформації та прозорості регулювання Україна впроваджує такі інструменти як:

- єдиний реєстр інтегрованих дозволів,

- оновлену систему моніторингу викидів,
- цифровий реєстр викидів та перенесення забруднювачів (PRTR),
- систему моніторингу дотримання BAT-AELs. [32].

Ключові результати адаптації українського законодавства до вимог IED :

- стимулювання модернізації промислових підприємств;
- зменшення рівнів забруднення повітря, води та ґрунтів;
- створення передумов для розвитку ресурсоефективних технологій;
- підвищення конкурентоспроможності української продукції на європейських ринках;
- прозорість та підзвітність екологічної діяльності підприємств.

Таким чином, інтеграція законодавства з вимогами ЄС не лише удосконалює систему екологічної безпеки, але й формує технологічну та економічну основу для сталого розвитку промисловості.

1.2.3. Національне законодавство України у сфері екологічної безпеки

Національна система екологічного законодавства України формує правові засади забезпечення екологічної безпеки, раціонального природокористування та охорони довкілля. Її структура включає закони, кодекси, підзаконні акти, державні стратегії, програми та стандарти, що регулюють різні аспекти екологічної політики. Законодавча база ґрунтується на принципах сталого розвитку, пріоритетності екологічної безпеки, запобігання забрудненню та відповідальності за порушення природоохоронних вимог [48; 51].

Нормативно - правове забезпечення екологічної безпеки в Україні регулюється широким комплексом законів. Основоположним є Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», який визначає загальні принципи екологічної політики, права та обов'язки суб'єктів

господарювання, порядок державного контролю та відповідальність за порушення природоохоронного законодавства [48].

Серед ключових галузевих законодавчих актів слід виділити:

- Закон України «Про охорону атмосферного повітря» [49], який встановлює нормативи гранично допустимих викидів, порядок отримання дозволів, вимоги до моніторингу забруднення та відповідальність за порушення вимог щодо викидів.
- Водний кодекс України [50], що регламентує спеціальне водокористування, встановлює вимоги до якості скидів стічних вод, порядок видачі дозволів і систему контролю за станом водних об'єктів.
- Закон України «Про управління відходами» [51], прийнятий у 2022 році як частина імплементації європейських директив, який запроваджує нову класифікацію відходів, принципи ієрархії поводження з відходами та елементи циркулярної економіки.
- Закон України «Про екологічну експертизу» та Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» (СЕО) [52], що регулюють оцінювання впливів державних програм, планів і проєктів на довкілля.
- Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (ОВД) [53], що з 2017 року є ключовим інструментом екологічної оцінки промислових проєктів та забезпечує відповідність українських процедур європейським стандартам, визначеним Директивою 2011/92/ЄС.
- Кодекс України про надра [54], який регулює порядок користування мінерально-сировинними ресурсами та встановлює екологічні вимоги до добувної промисловості.
- Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» [55], що визначає гігієнічні нормативи та вимоги до промислових об'єктів, у тому числі щодо поводження з небезпечними речовинами.

- Закон України «Про екологічний контроль» (2024, у процесі впровадження) [56], спрямований на реформування системи державного нагляду та приведення її у відповідність до європейських підходів інтегрованого контролю.

Окреме значення має гармонізація національного законодавства з вимогами Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди, що передбачає поступове впровадження інституту інтегрованих дозволів на викиди та переходу до регулювання на основі Найкращих доступних технологій (НДТМ/ВАТ). Для цього в Україні затверджуються секторальні довідники НДТМ, адаптовані до європейських BREF-документів [57].

У системі нормативного забезпечення важливу роль відіграють також постанови Кабінету Міністрів України, накази Міністерства охорони довкілля, стандарти ДСТУ, методики моніторингу та контролю якості атмосферного повітря, води й ґрунтів. Зокрема, діють:

- Порядок ведення Реєстру викидів і перенесення забруднювачів (PRTR) [58];
- Методика розрахунку обсягів викидів у атмосферу [59];
- Державні санітарні норми та гранично допустимі концентрації забруднювачів [60].

Таким чином, національне екологічне законодавство України формується як комплексна система, що поєднує галузеві нормативи, європейські стандарти та інструменти екологічної модернізації, спрямовані на скорочення промислових впливів та підвищення рівня екологічної безпеки.

У контексті виконання Угоди про асоціацію з ЄС важливим напрямом є наближення національного законодавства до екологічного аспис Європейського Союзу, що передбачає гармонізацію норм у сферах управління відходами, промислових викидів, хімічної безпеки, контролю за якістю повітря та води [61]. У 2022 р. в Україні запроваджено системну

реформу управління відходами шляхом ухвалення Закону «Про управління відходами», який впроваджує європейську модель поводження з відходами, принцип розширеної відповідальності виробника та ієрархію управління відходами [51].

Також триває робота над імплементацією Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди, що передбачає перехід до системи інтегрованих дозволів, використання найкращих доступних технологій (НДТМ/ВАТ) та суттєве посилення державного контролю за промисловими об'єктами [44].

Важливою частиною національного законодавства є система контролю за додержанням екологічних вимог, яка забезпечується:

- Державною екологічною інспекцією України (здійснює контроль і нагляд);
- Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України (формує політику);
- органами місцевого самоврядування (в межах делегованих повноважень).

Механізми екологічної відповідальності передбачають адміністративну, цивільну та кримінальну відповідальність, а також матеріальні компенсації за завдану шкоду довкіллю [49]. Нині держава також розширює інструменти економічного стимулювання, зокрема податки за використання природних ресурсів, платежі за викиди та скиди забруднювачів, а також систему екологічного страхування [62].

Останніми роками спостерігається цифровізація екологічної політики, зокрема розвиток електронних реєстрів викидів та відходів, платформ екологічного моніторингу, інтегрованих інформаційних систем (E-Environment). Адже це сприяє підвищенню прозорості, доступності даних та ефективності контролю за екологічною діяльністю підприємств [63].

1.2.4. Галузеве та технічне регулювання

Галузеве та технічне регулювання екологічної безпеки є важливою складовою системи державного управління охороною довкілля, оскільки спрямоване на встановлення спеціалізованих норм, правил та стандартів, що враховують особливості окремих секторів промисловості. У сучасних умовах трансформації української промисловості та адаптації законодавства до вимог Європейського Союзу даний напрям набуває особливого значення.

В Україні діє система галузевих екологічних нормативів, яка включає:

- галузеві стандарти екологічної безпеки, що регламентують допустимі рівні викидів, скидів, утворення відходів та використання природних ресурсів у конкретних секторах (металургійному, хімічному, енергетичному, гірничодобувному тощо);
- державні будівельні норми (ДБН), які встановлюють вимоги до проектування та експлуатації промислових об'єктів з урахуванням впливів на довкілля;
- технологічні регламенти, що містять вимоги до безпечної роботи обладнання, очищення газових та рідких викидів, контролю за утворенням промислових відходів.

Галузеве регулювання в Україні базується на положеннях законів «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про охорону атмосферного повітря», «Про відходи» (який у 2022 р. було замінено новим законом «Про управління відходами»), а також на підзаконних актах, що деталізують вимоги для окремих видів діяльності [41; 43].

Особливої уваги потребують галузі з найбільшим техногенним навантаженням: металургія, хімічна промисловість, енергетика, нафтопереробка, агрохімія, для яких розроблено поширені технологічні

нормативи використання води, викидів у повітря та відходів виробництва [47].

Технічне регулювання у сфері екологічної безпеки включає:

- державні стандарти (ДСТУ), які встановлюють вимоги до екологічної ефективності продукції та процесів;
- стандарти екологічного менеджменту (ISO 14000), що впроваджуються в Україні відповідно до міжнародних вимог;
- оцінку відповідності продукції та технологій екологічним критеріям;
- нормативи гранично допустимих викидів (ГДВ) та гранично допустимих скидів (ГДС).

У межах адаптації законодавства України до європейських норм важливе значення має впровадження стандартів, гармонізованих із регламентами ЄС, включно з екологічними маркуваннями, критеріями енергоефективності, екологічною сертифікацією продукції (еколейблінг) [42; 46].

Процеси технічного регулювання перебувають під координацією Міністерства економіки України, Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, а також Національного органу стандартизації, що забезпечує гармонізацію ДСТУ з технічними регламентами та директивами ЄС.

Процес гармонізації екологічних норм України з вимогами Європейського Союзу, що є необхідною складовою Угоди про асоціацію, включає значну модернізацію галузевого регулювання. Зокрема:

- оновлюються технологічні нормативи згідно з вимогами Директив ЄС щодо промислових викидів;
- триває адаптація українських галузевих стандартів до європейських довідників BREF, що встановлюють орієнтири для модернізації виробництв;

- у секторах енергетики, металургії та агропромислового комплексу впроваджуються найкращі доступні технології та методи управління (НДТМ/ВАТ) на основі європейської методології [44; 45].

Адаптація галузевих екологічних стандартів до вимог Європейського Союзу є ключовим чинником забезпечення сталого розвитку промисловості, оскільки вона одночасно підвищує конкурентоспроможність українських підприємств та мінімізує їхній негативний вплив на навколишнє середовище.

1.2.5. Економічні механізми регулювання екологічної безпеки

У системі екологічної політики важливе місце посідають економічні механізми, спрямовані на формування стимулів для зменшення негативного впливу промислових підприємств на довкілля та забезпечення виконання природоохоронних нормативів. На відміну від адміністративно-контрольних методів, економічні інструменти регулювання ґрунтуються на принципах екологічної відповідальності, «забруднювач платить» та внутрішньої інтеграції екологічних витрат у виробничі процеси [33]. У межах України ці механізми визначаються як сукупність фінансових, податкових та інвестиційних інструментів, що забезпечують дотримання екологічних стандартів і стимулюють екологічну модернізацію промисловості.

Основним економічним інструментом державного регулювання є екологічний податок, який справляється відповідно до Податкового кодексу України. Податок встановлюється за:

- викиди забруднюючих речовин у атмосферне повітря стаціонарними джерелами;
- скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти;
- розміщення відходів;
- викиди CO₂ та інших парникових газів [34].

Екологічний податок має стимулюючу функцію: підвищення ставок податку мотивує підприємства впроваджувати технології очищення викидів, зменшувати обсяги скидів та оптимізувати управління відходами. З 2022 року в Україні також ведеться поступове наближення ставок податку за викиди CO₂ до європейських підходів у контексті введення механізму СВAM – вуглецевого коригування на кордоні [35]. Важливим елементом економічного регулювання є плата за використання води, надр, лісових ресурсів та інших природних благ. Вона визначена у відповідних кодексах – Водному (1995), Лісовому (2006), Кодексі України про надра (1994) – та спрямована на обмеження надмірного використання природних ресурсів і формування ресурсоефективної моделі господарювання [36].

Кошти від екологічних податків та штрафів надходять до спеціальних фондів охорони навколишнього природного середовища державного та місцевих бюджетів і потім спрямовуються на:

- модернізацію систем очищення стічних вод;
- заходи зі зменшення викидів забруднюючих речовин;
- рекультивацію забруднених земель;
- моніторинг стану довкілля;
- впровадження природоохоронних технологій [37].

Упродовж останніх років зростає роль міжнародних фінансових інструментів, зокрема ЄБРР, ЄІБ та Глобального екологічного фонду (GEF), які підтримують промислові підприємства у модернізації виробництва відповідно до ВАТ [38].

Важливим механізмом мінімізації фінансових ризиків є екологічне страхування, пов'язаних із можливими аваріями, витокami небезпечних речовин, забрудненням територій та шкодою для здоров'я населення. Згідно із Законом України «Про страхування», підприємства підвищеної екологічної

небезпеки можуть бути зобов'язані укладати договори екологічного страхування, що забезпечують покриття витрат на ліквідацію наслідків аварій і компенсацію можливих збитків [39].

У контексті європейської інтеграції Україна також орієнтується на положення Директиви 2004/35/ЄС про екологічну відповідальність, яка передбачає принцип обов'язкового відшкодування шкоди довкіллю оператором діяльності, що її спричинив [40].

Роль економічних механізмів у стимулюванні екологічної модернізації. Економічні механізми регулювання сприяють:

- підвищенню ефективності природокористування;
- зниженню обсягів промислових викидів і відходів;
- прискоренню переходу до ресурсоефективних і екологічно безпечних технологій;
- внутрішній монетизації екологічних ризиків;
- формуванню умов для розвитку циркулярної економіки.

Таким чином, економічні інструменти виступають важливою складовою державної екологічної політики та системи управління промисловою екологічною безпекою. Їхня ефективність значною мірою залежить від узгодженості фіскальних стимулів з нормативно-правовими вимогами та гармонізації з європейськими регуляторними практиками.

Підсумовуючи підпункт 1.2. можна зазначити що нормативно-правова база екологічної безпеки України характеризується комплексністю, багаторівневістю та поступовим наближенням до стандартів Європейського Союзу. Законодавство охоплює як загальні засади охорони довкілля, так і спеціалізовані сфери регулювання, що стосуються атмосферного повітря, водних ресурсів, відходів, хімічної та радіаційної безпеки. Важливу роль відіграють підзаконні акти та технічні регламенти, які забезпечують

практичну реалізацію норм, визначаючи допустимі рівні впливів, порядок видачі дозволів, критерії оцінювання небезпечності та процедури державного контролю.

Суттєвим елементом сучасного нормативного поля є впровадження інструментів екологічної оцінки, зокрема ОВД та СЕО, що узгоджують національне законодавство з європейськими вимогами у сфері оцінки впливів на довкілля. Крім того, адаптація українського законодавства до *acquis* ЄС передбачає модернізацію підходів до управління відходами, інтегрованого запобігання промислового забрудненню, контролю за промисловими викидами та впровадження принципів циркулярної економіки.

Узагальнюючи, слід відзначити, що система екологічного законодавства України перебуває у фазі активного реформування, спрямованого на посилення екологічної безпеки, інтеграцію з європейським правовим простором та створення умов для сталого використання природних ресурсів. Однак ефективність нормативно-правового регулювання значною мірою залежить не лише від якості законодавчих актів, а й від рівня їх практичної імплементації, ресурсного забезпечення контролюючих органів та екологічної відповідальності суб'єктів господарювання.

1.3. Сучасні технології захисту довкілля в промисловості

У сучасних умовах індустріального розвитку екологічна безпека промислових підприємств значною мірою визначається рівнем впровадження інноваційних технологій, спрямованих на зменшення негативного впливу виробництва на довкілля. Сучасні природоохоронні технології охоплюють очищення викидів у атмосферу, підготовку та очищення стічних вод, поводження з відходами, впровадження енергоефективних рішень, а також системи цифрового моніторингу і контролю. Їх застосування є ключовим чинником переходу промисловості до моделі сталого розвитку та відповідності міжнародним екологічним стандартам.

1.3.1. Критерії вибору природоохоронних технологій у промисловості

Вибір технологій екологічного захисту в промисловості є багатофакторним процесом, що потребує комплексної оцінки технічних, економічних, екологічних та організаційних параметрів. Наукові підходи до обґрунтування природоохоронних рішень ґрунтуються на аналізі ефективності технологій, їх відповідності національним та міжнародним екологічним вимогам, а також здатності інтегруватися у виробничу інфраструктуру підприємства. В умовах переходу України до європейських стандартів екологічного регулювання особливого значення набуває відповідність технологій вимогам найкращих доступних технологій (BAT), визначених у довідниках BREF [64; 29; 69].

Вибір технологій екологічного захисту здійснюється з урахуванням низки критеріїв, що забезпечують відповідність як екологічним стандартам, так і економічним можливостям підприємства.

І першим розглянемо екологічний критерій. Екологічна ефективність природоохоронної технології визначається її здатністю забезпечувати зниження концентрації забруднювачів до встановлених нормативів та відповідати вимогам BAT-AEL — асоційованих рівнів викидів для найкращих доступних технологій [29; 68]. До ключових екологічних критеріїв належать:

- Ступінь вилучення забруднювачів (пил, оксиди сірки та азоту, леткі органічні сполуки, важкі метали тощо);
- Вплив на вторинне забруднення, зокрема утворення побічних відходів;
- Можливість мінімізації вуглецевого сліду виробничих процесів;
- Відповідність екологічним нормам ЄС та України.

Чим вищий рівень екологічної результативності, тим більша ймовірність отримання підприємством інтегрованого дозволу на викиди відповідно до європейського підходу Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) [29].

Також до важливих критеріїв відноситься економічний. Економічне обґрунтування вибору природоохоронних технологій включає оцінку як

початкових, так і експлуатаційних витрат. Основними економічними чинниками є:

- Капітальні витрати на проектування, закупівлю та встановлення обладнання;
- Операційні витрати, включаючи споживання енергії, реагентів, оплати обслуговування;
- Строк окупності інвестицій;
- Економія ресурсів, зокрема зменшення витрат на сировину, воду, паливо;
- Фінансові стимули та пільги, передбачені екологічною політикою держави (зниження екологічного податку, компенсаційні програми тощо) [67].

З погляду циркулярної економіки економічні ефекти включають можливість повторної реалізації цінних компонентів відходів або перетворення їх на вторинну сировину.

Технічні та технологічні критерії. Ця група критеріїв визначає можливість стабільного та ефективного функціонування технології в умовах конкретного виробництва. Враховується:

- Технологічна сумісність з існуючим обладнанням та виробничими процесами;
- Надійність та довговічність обладнання;
- Простота експлуатації та обслуговування, включно з потребою у висококваліфікованому персоналі;
- Енергоефективність і технологічна оптимальність;
- Масштабованість технології для підприємств різного розміру [65; 66].

У сучасній практиці пріоритет надається технологіям, які можуть інтегруватися у комплексні системи очищення та забезпечувати синергетичний ефект.

Організаційно-регуляторні критерії. Адже вибір природоохоронних технологій має відповідати чинному законодавству України у сфері охорони довкілля, зокрема Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», Закону «Про оцінку впливу на довкілля» та іншим нормативам у галузі промислової екології [48; 53]. Важливими організаційними факторами є:

- Відповідність умовам для отримання інтегрованого дозволу на викиди;
- Дотримання стандартів екологічного менеджменту ISO 14001;
- Можливість отримання підприємством екологічної сертифікації;
- Наявність кваліфікованого персоналу для експлуатації систем.

А також соціальні критерії. До них належить вплив технології на безпеку працівників, зменшення екологічних ризиків для населення, можливість підвищення корпоративної екологічної відповідальності підприємства, що впливає на його репутацію та інвестиційну привабливість [70].

Таким чином, вибір природоохоронних технологій у промисловому секторі є стратегічним процесом, що потребує всебічного аналізу економічних, технологічних, екологічних та соціальних параметрів. Відповідність критеріям ВАТ і сучасним екостандартам забезпечує не лише мінімізацію негативного впливу на довкілля, а й підвищення конкурентоспроможності підприємств та їх інтеграцію у європейський ринок.

1.3.2. «Зелені» технології та концепція чистого виробництва

Розвиток сучасної промисловості пов'язаний із переходом від традиційної лінійної моделі («виробництво – споживання – відходи») до екологічно орієнтованої парадигми, в центрі якої знаходяться «зелені» технології та

концепція чистого виробництва. Ці підходи спрямовані на максимальне зменшення негативного впливу промислових процесів на довкілля, раціональне використання ресурсів та підвищення енергоефективності виробничих систем [71].

«Зелені» технології (англ. green technologies, environmentally sound technologies) — це технологічні рішення, розроблені з метою зниження використання невідновлюваних ресурсів, скорочення викидів забруднювальних речовин, мінімізації утворення відходів та забезпечення більш збалансованого функціонування промисловості в екосистемних межах [72]. Вони охоплюють широкий спектр технологічних напрямів: енергоощадні системи, безвідходні та маловідходні технологічні процеси, відновлювані джерела енергії, замкнуті цикли водопостачання, системи очищення викидів нового покоління, а також цифрові інструменти моніторингу впливу на довкілля [73].

Згідно з напрацюваннями Програми ООН з довкілля (UNEP), «зелені» технології є ключовим механізмом переходу до зеленої економіки та досягнення цілей сталого розвитку, зокрема ЦСР 9 (Інновації та інфраструктура) і ЦСР 12 (Відповідальне споживання та виробництво) [74].

Чисте виробництво (англ. Cleaner Production) — це системний превентивний підхід до екологізації промислових процесів, що передбачає зменшення негативного впливу на довкілля на всіх стадіях життєвого циклу продукції, а не лише шляхом упровадження кінцевих технологій очищення [75]. Ключові принципи чистого виробництва включають: оптимізацію використання матеріальних і енергетичних ресурсів, зниження утворення відходів та викидів безпосередньо в технологічному процесі, заміщення токсичних або небезпечних речовин більш екологічними альтернативами, удосконалення технологічних схем з метою досягнення ресурсної замкнутості [76].

На відміну від традиційного «кінцевого» очищення (end-of-pipe solutions), яке лише обмежує обсяг забруднень на виході, чисте виробництво усуває причини їх виникнення, що робить його більш економічно ефективним. Дослідження Організації Об'єднаних Націй з промислового розвитку (UNIDO) показують, що впровадження принципів чистого виробництва дозволяє підприємствам скоротити споживання ресурсів на 10–30 %, а обсяг утворення промислових відходів — на 20–50 % [77].

До типових практичних рішень, що належать до «зелених» технологій у промисловому секторі, належать:

- модернізація енергетичного обладнання та використання ВДЕ (сонячні колектори, когенераційні установки, теплові насоси);
- впровадження матеріалів із низькою токсичністю та підвищеною придатністю до перероблення;
- замкнуті системи водопостачання, що дозволяють мінімізувати споживання води та обсяг скидів;
- високоефективні системи очищення газових викидів, зокрема фільтри нового покоління, електрофільтри, плазмохімічні системи;
- цифрові системи екомоніторингу та прогнозування впливів на довкілля [78].

Застосування таких рішень є важливою умовою досягнення відповідності до вимог НДТМ (BAT) та міжнародних стандартів ISO 14001 і ISO 50001.

Перехід до чистого виробництва та екологічно орієнтованих технологій є ключовою умовою виконання Україною міжнародних екологічних зобов'язань, зокрема Угоди про асоціацію з ЄС та міжнародних кліматичних угод. Це забезпечує:

- зменшення екологічних ризиків,
- підвищення ресурсної ефективності,
- зростання конкурентоспроможності підприємств,

- зменшення соціально-економічних витрат від забруднення довкілля,
- розвиток інноваційних технологічних секторів [74; 77].

Таким чином, концепція чистого виробництва та інтеграція «зелених» технологій є стратегічним напрямом модернізації промисловості, що забезпечує одночасне досягнення економічної ефективності та високих стандартів екологічної безпеки.

1.3.3. Технології очищення атмосферного повітря

Очищення атмосферного повітря від промислових викидів є одним з ключових напрямів екологічної модернізації підприємств, оскільки викиди твердих частинок, оксидів азоту, діоксиду сірки, летких органічних сполук (ЛОС) та інших токсичних домішок становлять значну загрозу довкіллю та здоров'ю населення [78]. У сучасній практиці застосовують широкий спектр технологій очищення викидів, які різняться за принципом дії, ефективністю, вартістю та можливістю інтеграції у виробничі процеси. Залежно від характеристик забруднювачів, нормативних вимог та рекомендацій НДТМ (ВАТ), підприємства впроваджують або окремі технологічні рішення, або комбіновані системи очищення [79]. Механічні фільтри та циклони — призначені для вилучення пилу та твердих частинок з газових потоків; використовуються у металургії, деревообробці, цементному виробництві.

Механічні методи очистки ґрунтуються на фізичному відокремленні твердих частинок із газового потоку. Серед них найбільш поширені:

- циклонні апарати — використовуються для вилучення крупнодисперсних частинок шляхом створення закрученого потоку й дії відцентрових сил;

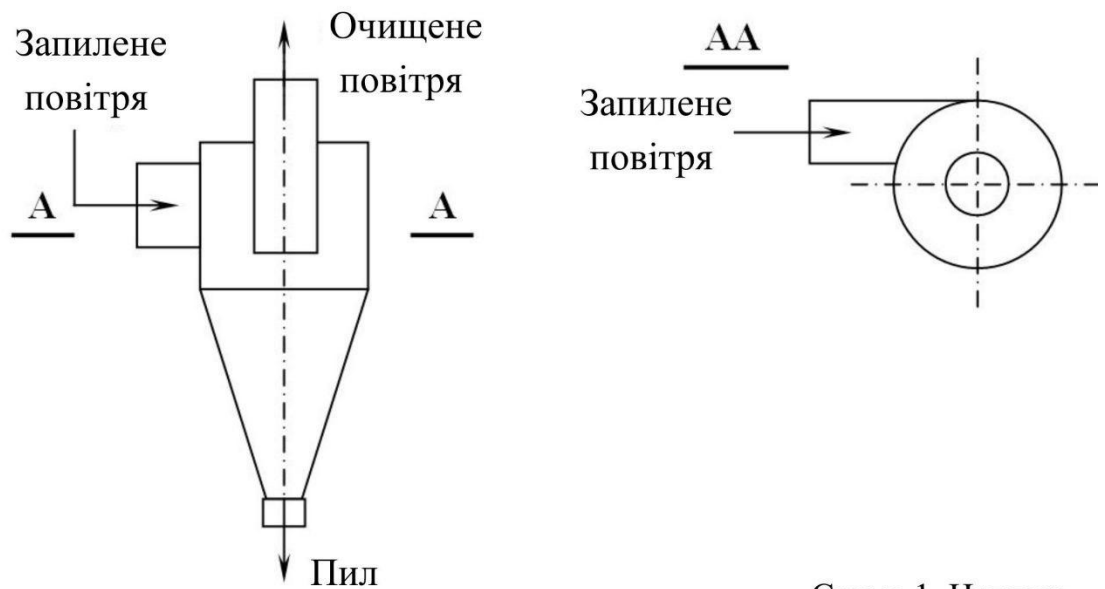
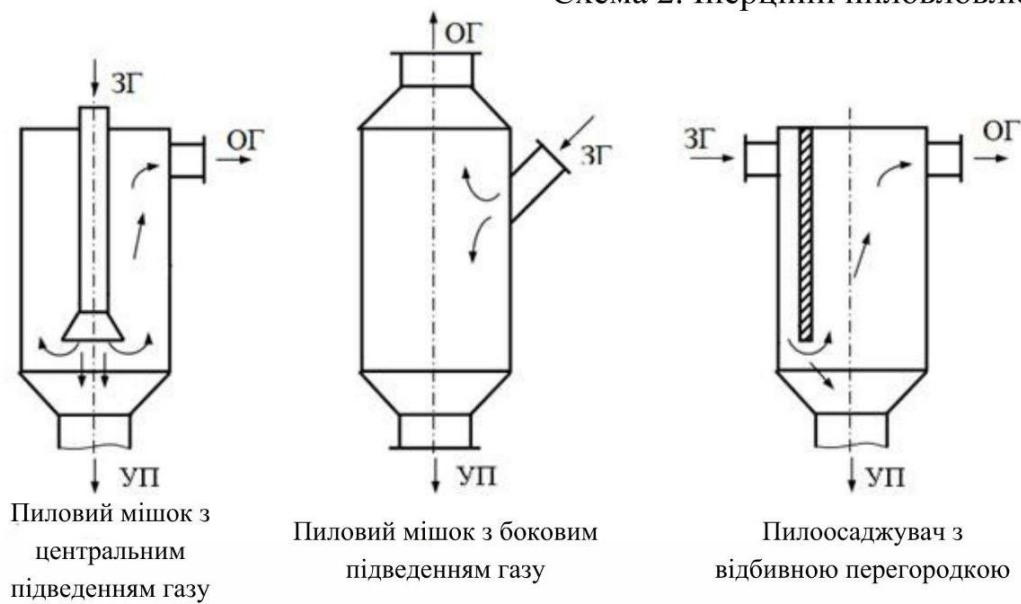


Схема 1. Циклон

застосовуються в металургії, деревообробці, цементній промисловості [80];

- інерційні пиловловлювачі — ефективні для середньодисперсного пилу та використовуються як попередній етап очищення;

Схема 2. Інерційні пиловловлювачі



- рукавні фільтри (тканинні) — забезпечують глибоке очищення газів від дрібнодисперсного пилу з ефективністю понад 99 %, що відповідає європейським стандартам ВАТ для цементних, аграрних та харчових підприємств [81].

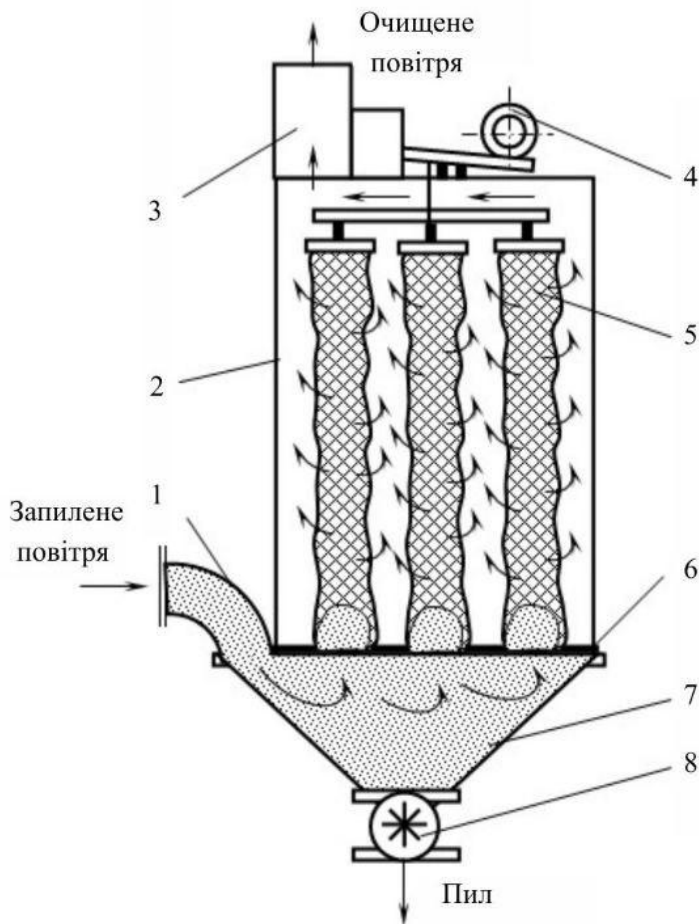
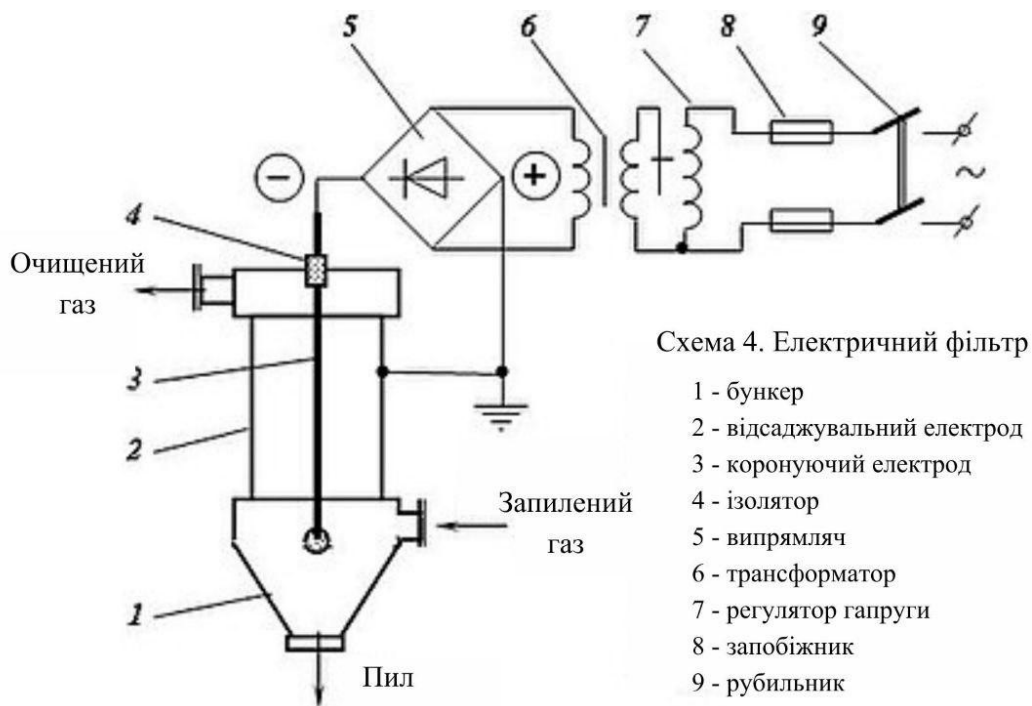


Схема 3. Рукавний фільтр

- 1 - вхідний патрубок
- 2 - корпус
- 3 - вихідний патрубок
- 4 - струшуючий механізм
- 5 - рукава
- 6 - горизонтальна перемичка
- 7 - бункер
- 8 - шлюзовий затвор

Механічні методи є економічними та ефективними, однак переважно застосовуються для твердих частинок, і не придатні для вилучення газоподібних забруднювачів.

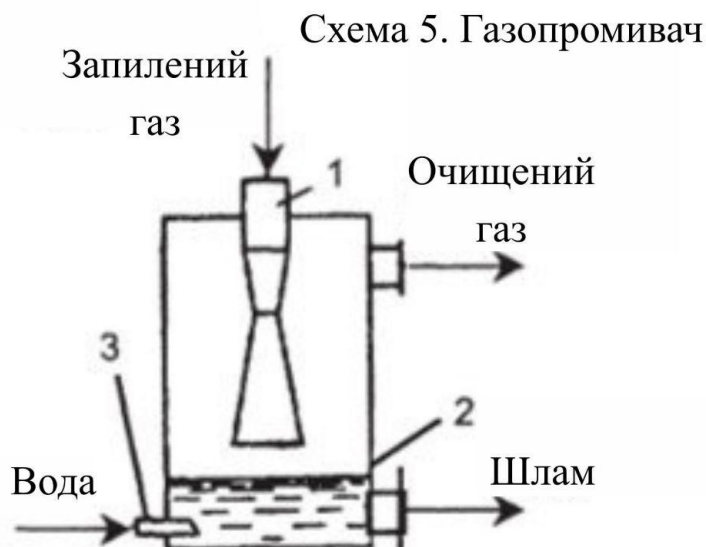
Електрофільтри або ж електростатичні осаджувачі базуються на електричному зарядженні частинок та їх осадженні на електродах. Вони вирізняються високою ефективністю очищення, особливо для дрібнодисперсних частинок ($PM_{2.5}$ і PM_{10}), що робить їх ключовою технологією на підприємствах енергетики та металургії [82]. Їхня продуктивність може перевищувати 99,9 %, що дозволяє досягти рівнів викидів, рекомендованих у європейських довідниках НДТМ (BREF) [83].



Абсорбційні технології ґрунтуються на поглинанні газових забруднювачів рідинними реагентами. Їх застосовують для видалення: діоксиду сірки (SO_2), хлористого водню (HCl), аміаку (NH_3) та летких органічних сполук.

До основних систем належать:

- газопромивачі,



- мокрі та сухі скрубери,

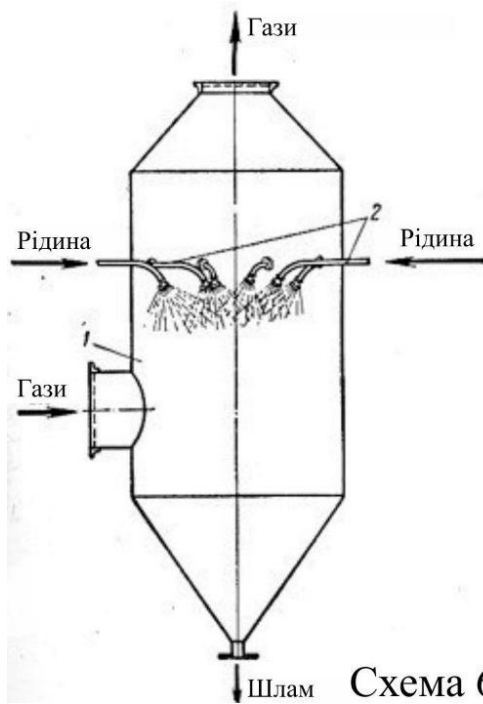


Схема 6. Мокрий скруббер

- хемосорбційні установки з використанням реагентів, а саме вапняного молока, натрійвмісних розчинів тощо.

Такі методи часто комбінують з механічними або електростатичними системами задля досягнення максимальної ефективності та відповідності до екологічних нормативів [84].

Адсорбційні методи використовують тверді поглиначі (активоване вугілля, цеоліти, полімерні сорбенти), які здатні вилучати: леткі органічні сполуки (ЛОС), канцерогенні речовини (наприклад, бензол), ртуть та інші токсичні метали. Цей метод є одним із найбільш ефективних для підприємств хімічної промисловості, фармацевтики та виробництва лакофарбових матеріалів [85].

Каталітичне та термічне окиснення застосовують для видалення органічних газоподібних забруднювачів та оксидів азоту. Дія таких систем ґрунтується на перетворенні токсичних речовин на CO_2 та H_2O : термічні окиснювачі здійснюють спалювання ЛОС за високих температур; каталітичні нейтралізатори працюють при нижчих температурах за рахунок каталізаторів

(Pt, Pd, Cu). Такі технології характерні для поліграфічної, лакофарбової, нафтохімічної промисловості [86].

Біофільтри, біоскрубери та біореактори використовують мікроорганізми, здатні розкладати органічні та неорганічні забруднювачі. Це екологічно безпечні та енергоефективні технології, що набувають поширення в харчовій, сільськогосподарській та деревообробній галузях [87]. Вони є прикладом «зелених» технологій, що відповідають принципам циркулярної економіки.

Європейська практика свідчить, що найбільш ефективні результати досягаються завдяки використанню комбінованих систем, які поєднують механічні, електростатичні, абсорбційні та каталітичні методи. Саме такі рішення рекомендуються у документах BREF та вважаються найкращими доступними технологіями (BAT) для галузей з високими обсягами викидів [83].

1.3.4. Технології очищення та підготовки стічних вод

Очищення та підготовка стічних вод є одним із ключових напрямів забезпечення екологічної безпеки, охорони водних ресурсів та мінімізації негативного антропогенного впливу на довкілля. Зростання обсягів промислових, комунальних та сільськогосподарських стоків зумовлює необхідність впровадження високоефективних, енергозберігаючих та інноваційних технологій їх очищення. Комплекс системи водоочищення традиційно включає механічні, фізико-хімічні, біологічні та мембранні процеси, які забезпечують поетапне видалення забруднених речовин різної природи та дисперсності [88].

Механічні методи очищення використовують на початковій стадії для вилучення крупнодисперсних та нерозчинних домішок. До них належать решітки, подрібнювачі, відстійники та піскоуловлювачі, які дозволяють

знизити навантаження на наступні етапи очищення та запобігти порушенню роботи обладнання.

Біологічне очищення, що здійснюється за участю мікроорганізмів, є базовим методом усунення біогенних та органічних забруднень. Сучасні біореактори з активним мулом, біофільтри, а також мембранні біореактори (MBR) забезпечують стабільно високий рівень очищення навіть для стоків із варіативним складом [89].

Фізико-хімічні методи відіграють важливу роль у видаленні важких металів, токсичних речовин, фосфатів і нафтопродуктів. Серед них широко застосовуються коагуляція, флокуляція, сорбція та електрохімічні процеси [90; 92].

Адсорбційні методи очищення ґрунтуються на здатності поверхні спеціальних матеріалів — адсорбентів — поглинати розчинені органічні та неорганічні речовини. Найбільш поширеними є активоване вугілля, цеоліти, силікагелі, модифіковані біосорбенти та наноструктуровані матеріали.

Адсорбційні технології є особливо ефективними при очищенні стічних вод від мікрозабрудників (фармпрепаратів, ПАР, фенолів), важких металів і продуктів нафтохімії. Перевагою методу є можливість регенерації адсорбентів та повторного використання, що робить процес економічно доцільним і екологічно сталим [91].

Електрохімічні методи очищення, такі як електрокоагуляція, електрофлотація та електроокиснення, набувають популярності завдяки здатності ефективно видаляти стійкі органічні забруднення, барвники, іони важких металів та патогенні мікроорганізми. Електрокоагуляція забезпечує утворення гідроксидних комплексів металів без додавання хімічних реагентів, що робить процес екологічно безпечним. Електроокиснення дозволяє руйнувати складні органічні сполуки до простих неорганічних компонентів, а електрофлотація ефективно вилучає завислі частинки та емульговані

забрудники [90; 93]. Застосування електрохімічних технологій є перспективним у випадках, коли традиційні методи не забезпечують необхідного рівня очищення.

Мембранні технології — ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотний осмос — забезпечують високий ступінь очищення від розчинених речовин, колоїдів і мікроорганізмів. Вони дають можливість отримати воду, придатну для повторного використання у виробництві або системах технічного водопостачання [91].

Кінцева стадія очищення зазвичай включає дезінфекцію, яка може здійснюватися УФ-опроміненням, озонуванням або хлоруванням. Найбільш екологічно безпечним методом вважається ультрафіолетове знезараження, оскільки воно не утворює побічних токсичних продуктів [92].

Таким чином, сучасні технології очищення стічних вод в Україні ґрунтуються на комплексному підході та передбачають послідовне застосування традиційних і інноваційних методів. Інтеграція адсорбційних та електрохімічних процесів у загальні системи водоочищення дозволяє досягти високої ефективності, відповідності нормативам і можливості повторного використання водних ресурсів, що відповідає європейським підходам та концепції сталого розвитку.

1.3.5. Технології утилізації та переробки промислових відходів

Переробка та утилізація промислових відходів є ключовими елементами сучасної екологічної політики та важливими складовими циркулярної економіки. Підхід до відходів як до вторинних матеріальних ресурсів сприяє зменшенню навантаження на довкілля, економії природних ресурсів та зниженню обсягів захоронення. Ефективні технології управління промисловими відходами базуються на принципах мінімізації утворення, повторного використання, матеріальної та енергетичної утилізації, а також екологічно безпечного знешкодження [94].

Механіко-біологічні та сортувальні технології застосовуються для попередньої підготовки відходів, їх розділення на придатні до переробки фракції й відділення небезпечних компонентів. У промисловому секторі вони дозволяють виокремлювати металовмісні, полімерні, мінеральні та органічні відходи для подальшої утилізації або переробки. Використання сучасних систем інтелектуального сортування (оптичного, магнітного, індукційного) значно підвищує ефективність відбору цінних компонентів [95].

Піроліз та газифікація являють собою високотемпературні методи термічної переробки відходів, які дозволяють перетворювати органічні речовини на газоподібні, рідкі або тверді вторинні продукти. Піроліз є ефективним для утилізації полімерів, гумових виробів та нафтовмісних відходів, утворюючи піролізний газ і рідке паливо. Газифікація забезпечує отримання синтез-газу, який може використовуватися у виробництві електроенергії, тепла або синтетичних матеріалів. Термохімічні методи дозволяють мінімізувати обсяг залишкових відходів і відповідають концепції енергетичної утилізації [96].

Компостування та анаеробне зброджування застосовуються здебільшого для органічних промислових відходів агропромислового комплексу, харчової та деревообробної промисловості. Анаеробні біореактори дозволяють переробляти органічні залишки з утворенням біогазу, який є цінним джерелом відновлюваної енергії. Тверда фракція після зброджування може бути використана як добриво або ґрунтополіпшувач [97].

Металургійна утилізація та вторинна переробка металовмісних відходів включає процеси агломерації, брикетування, флотації та гідрометалургії. Ці технології дозволяють відновлювати чорні та кольорові метали з шламів, шлаків, відходів гальванічних виробництв, каталізаторів та електронного брухту. Гідрометалургійні процеси (вилуговування, осадження, електроліз) є ефективними для вилучення цінних металів при мінімальному впливі на довкілля [98].

Технології переробки неорганічних та мінеральних відходів передбачають використання золошлакових матеріалів, будівельних відходів, відсівів і мінеральних шламів у виробництві цементу, бетону, дорожніх основ, керамічних матеріалів тощо. Застосування промислових відходів у будівельній галузі дозволяє зменшити обсяг видобутку природних ресурсів і скоротити площі полігонів [99].

Полімерні відходи промисловості утилізуються шляхом рециклінгу (первинного, вторинного та хімічного), грануляції, деполімеризації або піролізу. Найбільш екологічно доцільними вважаються методи механічного рециркування, однак у випадку забруднених або складних полімерних композицій перевага надається хімічним методам перетворення полімерних ланцюгів на мономери та низькомолекулярні фракції [96].

Знешкодження небезпечних промислових відходів (гальваношлами, токсичні хімічні реагенти, нафтопродукти, медичні та фармацевтичні залишки) здійснюється методами високотемпературного спалювання, плазмової деструкції, стабілізації та цементації. Плазмова технологія знешкодження дозволяє досягати температур понад 3000 °С, що забезпечує повне руйнування токсичних органічних сполук і зменшення токсичності кінцевого продукту [100].

Сучасні тенденції розвитку технологій утилізації промислових відходів передбачають інтеграцію принципів циркулярної економіки, промислового симбіозу та екологічного проектування продукції. Наголос робиться на максимальному поверненні матеріальних ресурсів у виробничі цикли, мінімізації небезпечних залишків і енергетичній ефективності виробництва. Таким чином, переробка та утилізація відходів стають не лише природоохоронною, а й економічно вигідною складовою сталого розвитку промисловості [94; 97].

1.3.6. Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології

Енергоефективність та ресурсозбереження є фундаментальними складовими екологічної модернізації промислових підприємств і визначають рівень їх відповідності принципам сталого розвитку та вимогам європейського екологічного законодавства. У контексті зростання цін на енергоресурси, необхідності декарбонізації та обмеження природних ресурсів підприємства активно впроваджують технології, що дозволяють оптимізувати енергоспоживання, зменшувати втрати ресурсів та мінімізувати негативний вплив на довкілля [101].

Одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності є використання вторинних енергетичних ресурсів — теплових відходів, парових конденсатів, газів відпалу тощо. Системи рекуперації тепла широко застосовуються у металургії, хімічній, харчовій та цементній промисловості. Теплообмінне обладнання (рекуператори, регенератори, економайзери) дає змогу повертати до 30–60 % енергії у виробничий цикл, зменшуючи потребу у первинних ресурсах [102].

Також важливим напрямом є впровадження систем когенерації та тригенерації, які забезпечують одночасне виробництво електроенергії, тепла та холоду. Такі системи відзначаються високим коефіцієнтом корисної дії (до 85–90 %) і дозволяють суттєво скоротити споживання викопного палива [103].

Оптимізація технологічних процесів та автоматизація

Для забезпечення підвищення точності керування та істотне зниження енерговитрат використовують цифровізацію виробничих процесів, застосовують SCADA-систем, промислового Інтернету речей (IIoT), технологій моделювання (Digital Twin). Автоматизовані системи дозволяють оптимізувати режими роботи агрегатів, уникати перевитрат ресурсів і зменшувати втрати у реальному часі [104].

Сучасні підходи до енергоменеджменту включають впровадження системи ISO 50001, яка забезпечує систематизацію процесів обліку, аналізу та зменшення енерговитрат на підприємстві. Дослідження показують, що промислові підприємства після впровадження стандарту досягають скорочення енергоспоживання на 5–15 % у перші роки [101].

Значний потенціал енергозбереження забезпечує модернізація промислового обладнання:

- Встановлення високоефективних електродвигунів класу IE3–IE4,
- Застосування частотних перетворювачів,
- Модернізація компресорних станцій,
- Використання насосного обладнання із змінною продуктивністю.

Такі заходи дозволяють зменшити енергоспоживання на 20–40 % залежно від галузі [105].

Підприємства дедалі частіше впроваджують замкнені цикли використання матеріальних ресурсів, що відповідає концепціям Cleaner Production та Zero Waste. У металургії та машинобудуванні широко застосовуються замкнені оборотні системи охолодження води, що зменшують водозабір до 80–95 % і дозволяють мінімізувати скиди стічних вод [106].

У хімічній та нафтопереробній промисловості застосовуються системи замкненого використання розчинників, реагентів і теплоносіїв. Застосування мембранних технологій дає змогу повернути у цикл цінні компоненти та зменшити витрати природних ресурсів [102].

Також варто зазначити що українські підприємства дедалі активніше інтегрують відновлювані джерела енергії, а саме:

- Сонячні електростанції на дахах виробничих цехів,
- Теплові насоси для потреб опалення та технологічного тепла,

- Біогазові установки для переробки відходів харчової та аграрної промисловості.

Поєднання відновлюваних джерел енергії з енергоефективними технологіями дозволяє зменшити вуглецевий слід промисловості та підвищити автономність енергопостачання [107].

Енергоефективні та ресурсозберігаючі заходи є ключовою передумовою виконання Україною своїх міжнародних зобов'язань у межах Паризької угоди та Європейського зеленого курсу. Зменшення енергоспоживання промисловістю безпосередньо впливає на рівень викидів парникових газів, сприяє декарбонізації виробництва і підвищує конкурентоспроможність українських підприємств на європейських ринках [108].

1.3.7. Системи моніторингу та цифрові технології екологічного контролю

Системи моніторингу та цифрові технології екологічного контролю є важливою складовою сучасної стратегії екологічної безпеки на промислових підприємствах. Вони забезпечують оперативне отримання, обробку і аналіз даних про стан природного середовища, що дає змогу своєчасно реагувати на зміни екологічної ситуації та запобігати негативним наслідкам виробничої діяльності.

Одним із ключових напрямів розвитку сучасних систем моніторингу є впровадження автоматизованих станцій контролю довкілля, що працюють у режимі реального часу та забезпечують безперервне вимірювання параметрів атмосферного повітря, води, ґрунтів, шумового й вібраційного забруднення. Завдяки використанню датчиків нового покоління, систем телеметрії та хмарних технологій, дані передаються до централізованих серверів, де вони обробляються та архівуються для подальшого аналізу [109].

У промисловості значного поширення набули цифрові платформи екологічного менеджменту, які забезпечують інтеграцію даних з різних виробничих систем, формують екологічну звітність, здійснюють

прогнозування ризиків. Використання програмних комплексів, таких як Environmental Management Systems (EMS), допомагає підприємствам відповідати національним і міжнародним стандартам екологічного аудиту та сертифікації, зокрема ISO 14001 [110].

Важливу роль відіграє також застосування геоінформаційних систем (ГІС), які дають змогу здійснювати просторовий аналіз екологічних даних, моделювати поширення забруднювачів, визначати потенційні зони ризику та підвищувати обґрунтованість природоохоронних рішень. ГІС-технології активно використовуються для планування екологічного моніторингу, інвентаризації відходів, оцінки стану водних ресурсів та ґрунтів [111].

Окремим напрямом є використання технологій Інтернету речей (ІоТ), що забезпечують створення «розумних» екологічних мереж. Підключені датчики вимірюють концентрації забруднювачів, рівні води, параметри викидів та передають дані у режимі онлайн. Це дозволяє промисловим підприємствам контролювати екологічні показники безпосередньо на технологічних ділянках та гарантувати дотримання нормативів викидів і скидів [112].

Суттєвих переваг у сфері екоконтролю надають технології обробки великих даних (Big Data) та машинного навчання, які дозволяють виявляти приховані закономірності, формувати прогнозні моделі забруднення, оптимізувати режими роботи очисного обладнання та мінімізувати екологічні ризики. Поєднання сенсорних мереж із алгоритмами ШІ створює основу для побудови інтелектуальних систем екологічного моніторингу нового покоління [113].

Сучасні тенденції також охоплюють використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для моніторингу важкодоступних промислових зон, територій з потенційним забрудненням або місць надзвичайних подій. Дрони, оснащені мультиспектральними камерами та газоаналізаторами, дозволяють

оперативно оцінити масштаб забруднення та визначити шляхи його поширення [114].

Таким чином, упровадження систем моніторингу та цифрових технологій екологічного контролю є необхідною умовою підвищення екологічної безпеки промислових підприємств. Вони забезпечують прозорість екологічних процесів, підвищують якість управлінських рішень, а також сприяють переходу до інноваційної та технологічно орієнтованої моделі природоохоронної діяльності.

1.3.8. Інтеграція та синергія сучасних природоохоронних технологій

Інтеграція та синергія природоохоронних технологій є ключовою умовою підвищення екологічної ефективності промислових підприємств у контексті сталого розвитку. Сучасні виклики, зокрема посилення екологічних нормативів, глобальна кліматична політика та зростання масштабів техногенного навантаження, потребують комплексного застосування різних технологічних рішень, які не лише доповнюють, а й взаємно підсилюють одне одного [115].

Одним із центральних принципів інтегрованого підходу є поєднання технологій очищення повітря, води та ґрунтів із системами енергоефективності, що дозволяє мінімізувати втрати ресурсів та забезпечити перехід до замкнених виробничих циклів. Наприклад, комбінування адсорбційних, мембранних та біологічних методів очищення стічних вод забезпечує високий ступінь видалення забруднювачів і створює можливість повторного використання води у промислових процесах [116].

Важливою складовою синергетичних рішень є глибока інтеграція відходопереробних технологій із системами енергетичної утилізації, зокрема виробництвом альтернативного палива, біогазу, теплової та електричної енергії. У межах концепції циркулярної економіки відходи дедалі частіше розглядаються як вторинні ресурси, які можуть бути включені до

матеріально-енергетичного балансу підприємства. Поєднання механіко-біологічної обробки, піролізу, компостування та RDF-технологій забезпечує максимальну утилізацію ресурсів і зменшення обсягів захоронення відходів [117].

Інтеграція природоохоронних технологій набуває особливої значущості в межах індустріальних симбіозів, де підприємства різних галузей об'єднуються у спільні технологічні кластери, використовуючи побічні продукти, тепло чи вторинну сировину одне одного. Така модель характерна для країн ЄС і поступово формується в Україні у межах регіональних індустріальних парків, сприяючи оптимізації ресурсних потоків та зменшенню екологічного сліду виробництва [118].

Цифровізація природоохоронної діяльності також сприяє синергії різних технологій. Використання цифрових платформ екологічного контролю, систем IoT, ГІС та алгоритмів машинного навчання дозволяє інтегрувати дані з різних об'єктів та технологічних процесів у єдину екологічну інформаційну систему. Це забезпечує комплексний моніторинг, підвищує прогностичну точність, оптимізує роботу очисних установок і сприяє ухваленню більш обґрунтованих управлінських рішень [111].

Інтеграційні природоохоронні рішення також охоплюють системи екологічного менеджменту, зокрема ISO 14001 та ISO 50001, що забезпечують системність, уніфікацію та контроль відповідності діяльності підприємств екологічним стандартам. Поєднання менеджменту, моніторингу та технологічних рішень формує основу для сталого технологічного розвитку і зміцнює екологічну відповідальність промислових підприємств [110].

Узагальнюючи, можна зазначити, що синергія сучасних природоохоронних технологій формує новий рівень екологічної безпеки, забезпечуючи комплексне вирішення проблеми забруднення, оптимізацію

ресурсоспоживання та інтеграцію підприємств у глобальні тренди сталого розвитку.

Підсумуємо пункт 1.3. Сучасні технології природоохоронного спрямування відіграють ключову роль у забезпеченні екологічної безпеки промислових підприємств та формуванні засад сталого розвитку. Проведений аналіз засвідчив, що екологізація виробництва потребує комплексного поєднання технічних, організаційних та управлінських рішень, які охоплюють усі аспекти впливу промисловості на довкілля.

По-перше, важливим елементом є науково обґрунтований вибір технологій, що враховує ефективність очищення, економічні параметри, відповідність найкращим доступним технологіям (ВАТ), гнучкість у впровадженні та можливість інтеграції в існуючу виробничу інфраструктуру. Сучасні підприємства дедалі частіше переходять від концепції «кінцевого очищення» до превентивних підходів, заснованих на принципах «зелених» технологій та чистого виробництва.

По-друге, промислові підприємства впроваджують широкий спектр технологій очищення атмосферного повітря, стічних вод та переробки відходів, серед яких механічні, хімічні, фізико-хімічні, мембранні, біологічні, адсорбційні й електрохімічні методи. Їх застосування забезпечує значне зниження викидів та скидів забруднювачів, сприяючи відповідності екологічним нормативам та поліпшенню екологічного стану довкілля.

По-третє, все більш актуальним стає використання енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій, що дозволяють оптимізувати виробничі витрати, мінімізувати втрати енергії та води, а також підтримують циркулярний характер промислових процесів. Це є ключовим елементом технологічної модернізації та конкурентоспроможності підприємств.

По-четверте, цифровізація екологічного контролю — впровадження онлайн-моніторингу, IoT, ГІС-систем, платформ Big Data та алгоритмів машинного

навчання — створює новий рівень точності, прозорості та оперативності управління екологічними ризиками. Інтеграція цифрових інструментів сприяє підвищенню ефективності природоохоронних систем та ухваленню обґрунтованих управлінських рішень.

Нарешті, особливого значення набуває синергія та інтеграція різних природоохоронних технологій. Поєднання методів очищення, систем енергоефективності, цифрових інструментів контролю та відходопереробних процесів забезпечує комплексний екологічний ефект, що перевищує суму індивідуальних технологічних рішень. Саме інтегровані системи є сьогодні ключовим інструментом екологічної модернізації та основою переходу до циркулярної та низьковуглецевої економіки.

Отже, сучасні природоохоронні технології формують цілісну багатокomпонентну систему, яка забезпечує зниження техногенного навантаження, оптимізацію виробничих процесів, підвищення екологічної відповідальності та відповідність промисловості міжнародним стандартам і європейським вимогам. Їх комплексне впровадження є необхідною умовою екологічної трансформації промисловості України та інтеграції в глобальні екологічні тенденції.

У першому розділі було системно досліджено сучасні теоретичні, правові та технологічні основи забезпечення екологічної безпеки промисловості. Аналіз показав, що промислові підприємства залишаються одним із ключових джерел техногенного навантаження на довкілля, формуючи комплексні екологічні проблеми — забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів, ґрунтів, накопичення відходів, деградацію екосистем і посилення кліматичних змін. Характер і масштаби цього впливу зумовлюють необхідність переходу від лінійної економічної моделі до засад циркулярної економіки, розвитку промислового симбіозу та впровадження ресурсоефективних виробничих систем.

У межах дослідження було встановлено, що нормативно-правове забезпечення екологічної безпеки в Україні формується на основі комплексної системи законодавчих актів, державних стандартів, галузевих регламентів та міжнародних зобов'язань. Значну роль відіграє гармонізація національного законодавства з правом ЄС, зокрема імплементація Директиви 2010/75/ЄС (IED), перехід до інтегрованих дозволів, застосування довідників найкращих доступних технологій (BAT/BREF) та впровадження принципів європейської екологічної політики. Водночас важливим інструментом регулювання є економічні механізми — екологічні податки, плата за викиди, фонди охорони навколишнього середовища, а також екологічне страхування, що стимулює підприємства до зниження ризиків і модернізації виробництва.

Окремий акцент зроблено на аналізі сучасних природоохоронних технологій, які є основою екологічної модернізації промисловості. Доведено, що ефективне управління екологічним впливом потребує комплексного використання технологій очищення викидів у повітря, підготовки та очищення стічних вод, переробки відходів, упровадження енергоефективних та ресурсозберігаючих рішень, а також сучасних цифрових систем моніторингу та екологічного контролю. Важливими є критерії вибору технологій, їх інтеграція та поєднання в єдині екологічно орієнтовані системи, що забезпечують синергетичний ефект та відповідність міжнародним екологічним стандартам.

Узагальнюючи результати дослідження, слід зазначити, що екологічна трансформація промисловості можлива лише за умов одночасного вдосконалення законодавчої бази, підвищення екологічної відповідальності підприємств, економічної мотивації впроваджувати новітні технології та комплексної модернізації виробничих процесів. Розділ 1 сформував теоретичну основу для подальших аналітичних і практичних досліджень, які будуть спрямовані на оцінювання ефективності сучасних технологій та

розроблення пропозицій щодо підвищення екологічної безпеки промислових об'єктів.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЕКОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ НА ПРИКЛАДІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

2.1. Загальна характеристика підприємства

ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (далі – АМКР) є одним із найбільших металургійних комбінатів України та ключовим підприємством чорної металургії Східної Європи. Підприємство входить до міжнародної корпорації ArcelorMittal, яка є світовим лідером у виробництві сталі та має представництва у понад 60 країнах світу [119]. АМКР розташоване в місті Кривий Ріг Дніпропетровської області – регіоні з високою концентрацією гірничо-металургійних підприємств, що зумовлює його стратегічне значення для економіки країни.

2.1.1. Загальні відомості про підприємство

Історія підприємства починається у 1930-х роках, коли було засновано металургійний завод «Криворіжсталь», який у подальшому перетворився на один із найбільших комбінатів повного циклу в Європі. У 2005 році підприємство було приватизоване та увійшло до складу компанії ArcelorMittal, що стало поштовхом для модернізації виробничих процесів, оновлення обладнання та впровадження сучасних стандартів екологічного менеджменту [120].

Сьогодні виробнича інфраструктура АМКР охоплює всі основні етапи металургійного циклу — від підготовки сировини до випуску готової металопродукції. До складу комбінату входять агломераційне, доменне, сталеплавильне та прокатні виробництва, енергетичні цехи, транспортні підрозділи, а також допоміжні та сервісні служби. Підприємство є одним із найбільших роботодавців регіону та ключовим експортером металопродукції, забезпечуючи значну частку валютних надходжень держави [121].

З екологічної точки зору АМКР належить до категорії підприємств із підвищеним рівнем техногенного навантаження, що зумовлено масштабною виробництвом та характером металургійних технологічних процесів. Саме тому в структурі управління комбінату функціонує розгалужена система екологічного контролю, а також реалізуються програми модернізації, спрямовані на зниження викидів забруднювальних речовин, підвищення ефективності очищення газів і стічних вод, оптимізацію поводження з відходами та впровадження енергоощадних технологій [122].

Загалом ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є промисловим комплексом, який поєднує класичні металургійні технології з елементами сучасної екологічно орієнтованої модернізації, що визначає його як репрезентативний приклад для аналізу екологічних аспектів роботи великих промислових підприємств.

2.1.2. Характеристика виробництва

Виробнича діяльність ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» здійснюється за повним металургійним циклом, який охоплює всі стадії переробки залізорудної сировини — від підготовки концентрату до виготовлення готової продукції у вигляді сталі та прокату. Така структура виробництва забезпечує підприємству високий рівень автономності та контроль над технологічними параметрами на всіх етапах металургійного процесу [122].

Основу виробничого комплексу становлять:

- агломераційне виробництво, що забезпечує підготовку залізорудної сировини шляхом отримання агломерату з концентратів та дрібних фракцій руди;
- доменне виробництво, де з агломерату та коксу в доменних печах виплавляється чавун;
- сталеплавильне виробництво, представлене конвертерними агрегатами, в яких чавун переробляється на сталь;

- прокатне виробництво, що включає дровий та сортовий стани для виготовлення кінцевої продукції з різними технічними характеристиками [123].

АМКР спеціалізується на виробництві довгомірного прокату, включно з арматурою, катанкою, профілями та сортовою продукцією, що використовується у будівництві, машинобудуванні та транспортній галузі. Значна частина продукції експортується на європейські, азійські та близькосхідні ринки, що обумовлює необхідність дотримання міжнародних стандартів якості та екологічної безпеки [121].

Технологічна інфраструктура підприємства включає також коксохімічне виробництво, енергетичний комплекс, інженерні мережі, транспортно-логістичні підрозділи та систему внутрішнього контролю якості. Коксохімічні агрегати забезпечують підприємство коксом і доменним газом, а теплоелектростанції — власною електричною та тепловою енергією [124].

Виробничі потужності комбінату характеризуються високою продуктивністю, проте через використання переважно традиційних металургійних технологій підприємство належить до категорії об'єктів із високим рівнем негативного впливу на довкілля. Це визначає необхідність систематичної модернізації технічного обладнання та впровадження природоохоронних технологій відповідно до вимог інтегрованих європейських підходів та стандартів ВАТ (Best Available Techniques) [125].

Таким чином, виробництво ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є багатокомпонентним технологічним комплексом, який поєднує класичні металургійні процеси з елементами сучасної автоматизації та екологічної модернізації. Це робить підприємство репрезентативною моделлю для аналізу впливу промислової діяльності на навколишнє природне середовище.

2.1.3. Технологічний цикл підприємства

Технологічний цикл АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є комплексним металургійним процесом повного циклу, який охоплює всі стадії виробництва сталі — від видобутку та збагачення залізорудної сировини до виготовлення готової прокатної продукції. Кожен етап виробництва супроводжується утворенням викидів в атмосферне повітря, стічних вод та промислових відходів, що формує відповідні екологічні ризики.

Технологічний процес можна поділити на 7 основних етапів:

1. Видобуток та збагачення руди

Підприємство здійснює видобуток залізної руди у кар'єрах Південного гірничо-збагачувального комбінату (ПГЗК), який входить до складу виробничого ланцюга. Потім руда подрібнюється та проходить магнітне збагачення для отримання залізорудного концентрату.

Супроводжується такими екологічними ризиками як:

- Пилові викиди від дробарок і транспортних операцій;
- Відходи збагачення – хвости флотації, шлами;
- Втрати якості стічних вод, що утворюються під час мокрого збагачення.

2. Виробництво агломерату (аглофабрика)

Концентрат разом із флюсами (вапняк, доломіт) і коксовою дрібницею подається на агломераційні машини для випалювання та формування агломерату, що є основною сировиною для доменного виробництва.

Екологічні ризики:

- Значні викиди пилу, оксидів азоту (NO_x), оксидів сірки (SO_x), вуглекислого газу (CO_2);
- Утворення фільтрувального пилу та шламів газоочисних установок;
- Емісії діоксинів та фуренів у періодичному режимі роботи старих агломашин.

3. Коксохімічне виробництво

Для забезпечення доменного процесу підприємство має коксохімічний комплекс, де з кам'яного вугілля у коксових батареях отримують кокс. Побічно утворюються коксовий газ, аміачна вода, бензолна фракція тощо.

Екологічні ризики:

- Викиди бензолу, толуолу, фенолу, сірководню;
- Утворення смол, пеку та інших токсичних відходів;
- Забруднення стічних вод органічними сполуками та амонійним азотом.

4. Доменне виробництво

Агломерат, кокс і флюси подаються у доменні печі для отримання чавуну.

Екологічні ризики:

- Викиди пилу, оксиду вуглецю (CO), діоксиду вуглецю (CO₂), SO₂;
- Утворення доменного шлаку, коксового та агломераційного пилу;
- Утворення доменних газів, частково утилізованих у системах енергозабезпечення.

5. Киснево-конвертерне виробництво (ККЦ)

Рідкий чавун і металобрухт подаються у конвертери, де продування киснем дозволяє отримати сталь.

Екологічні ризики:

- Інтенсивні викиди пилу та оксидів азоту;
- Генерація сталеплавильного шлаку;
- Викиди важких металів (Mn, Zn, Pb) при неповному очищенні газів.

6. Вторинна металургія та розливання сталі

Сталь проходить доведення у ковшах та розливається на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Екологічні ризики:

- Утворення шлаків та пилу;

- Металургійні шлами від систем мокрого очищення газів;
- Нагрівальні печі утворюють викиди CO₂ та NO_x.

7. Прокатне виробництво

Заготовки подаються на дрововий, сортовий та листопрокатний стани. Тут виробляють арматуру, катанку, прокатні профілі, круглий метал тощо.

Екологічні ризики:

- Викиди від нагрівальних печей;
- Утворення окалини, мастильно-емульсійних відходів;
- Стічні води з масштабною циркуляційною системою охолодження.

Технологічний цикл АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є енергомістким та екологічно навантаженим. Найбільші ризики пов'язані з агломераційним, коксохімічним та сталеплавильним виробництвами. Саме вони потребують модернізації, переоснащення газоочисних систем і впровадження сучасних технологій моніторингу та управління промисловими викидами.

Точки виникнення забруднень у технологічному циклі АМКР в таблиці.

Таблиця 1

Етап виробництва	Атмосферні викиди	Стічні води	Тверді відходи
Збагачення руди	пил, NO _x	Шламіві води	Хвости, шлами
Аглофабрика	пил, NO _x , SO _x , діоксини	Промивні води	Аглошлам, фільтрувальний пил
Коксохімія	органічні сполуки (бензол, фенол), H ₂ S	Аміачні води	Смола, пек
Доменне виробство	CO ₂ , CO, SO ₂	Оборотні води	Доменний шлак
ККЦ	пил, NO _x , важкі метали	Шламіві води	Стале плавний шлак, пил, шлами

Вторинна металургія	викиди від нагріву сталі, CO ₂ , NO _x	Води систем мокрого очищення	Шлаки ковшової обробки, металургійні шлами
Прокатні стани	CO ₂ , NO _x	Масло-емульсійні токи	окалина

2.1.4. Сировина та продукція підприємства

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» використовує широкий спектр мінеральної та техногенної сировини, необхідної для повного циклу металургійного виробництва. Основні види сировини формують вхідні матеріальні потоки, що визначають обсяги утворення відходів, структуру енергоспоживання та інтенсивність екологічних впливів.

До основних видів сировини відносяться зокрема:

Залізорудна сировина, яка використовується у вигляді руд залізистих кварцитів з кар'єрів Криворізького басейну, концентратів, отриманих у процесі збагачення, агломерату, що виготовляється на власних аглофабриках.

Коксівне вугілля та кокс. Коксівне вугілля імпортується та частково надходить з українських шахт. На підприємстві працює коксохімічне виробництво, де отримується кокс для доменного процесу.

Флюсуючі добавки, такі як: вапняк, доломіт та інші кальцієво-магнієві матеріали. Флюси необхідні для формування доменного та сталеплавильного шлаку.

Домішки та легувальні матеріали. Вони використовуються у сталеплавильному та вторинному металургійному виробництві: феросиліцій, феромарганець, ферохром, алюміній, силікокальцій тощо.

Паливо та енергоносії, такі як: природний газ, доменний та коксовий газ (внутрішні побічні продукти), електроенергія, технічний кисень, азот, аргон.

Промислова вода яка використовується для охолодження, мокрого очищення газів, гасіння коксу, гідротранспортування шламів.

Готова продукція підприємства

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є одним із найбільших виробників довгомірного прокату в Європі. Основна продукція включає:

Напівфабрикати, а саме: заготовка (квадратна та кругла), блюм та сляб (залежно від технологічного процесу).

Прокат будівельного призначення: арматурна сталь різних класів міцності, катанка, профілі будівельні (кутники, швелери).

Катана продукція: дріт низьковуглецевий та середньо вуглецевий, дріт для канатів та інших спеціальних застосувань.

Побічна продукція: доменний шлак (частково використовується як цементна добавка), сталеплавильний шлак, коксовий газ та хімічні продукти коксування (бензол, смола тощо), окалина, металеві шлами, пил газоочисних установок.

Склад і обсяги споживаної сировини визначають інтенсивність утворення доменного та сталеплавильного шлаку, кількість пилогазових викидів на стадіях агломерації й конвертерного продування, обсяги шламів та стічних вод у системах мокрого очищення, структуру енергоспоживання та пов'язані з цим викиди парникових газів.

Тому аналіз сировинної бази є ключовою передумовою для подальшої оцінки екологічних ризиків підприємства та визначення можливостей впровадження природоохоронних технологій.

Отже, підприємства металургійної промисловості становлять одну з ключових основ індустріального потенціалу України, забезпечуючи виробництво чавуну, сталі, прокату та широкої номенклатури металопродукції. Їхня діяльність тісно пов'язана з великими обсягами

споживання сировини, енергії та води, що зумовлює підвищені екологічні та технологічні ризики, а також формує потребу у високому рівні виробничого контролю та безпеки.

Українська металургія включає повний цикл виробництва — від заготівлі сировини до відвантаження готової продукції, що дозволяє утримувати конкурентні позиції на світових ринках. Водночас функціонування таких підприємств можливе лише за умови ефективного управління техногенними ризиками, модернізації технологічних процесів і забезпечення стійкості виробничих систем. Це робить металургійні об'єкти важливою складовою як економічної, так і техногенної безпеки держави.

2.2. Ідентифікація екологічних ризиків підприємства

2.2.1. Аналіз викидів у атмосферне повітря

Викиди забруднюючих речовин у атмосферне повітря є одним із ключових факторів екологічного впливу металургійних підприємств повного циклу. Їхня структура, обсяги та динаміка визначають рівень техногенного навантаження на довкілля та формують потенційні ризики для населення прилеглих територій. На основі відкритих даних державних екологічних ресурсів та інформації підприємства проведено аналіз основних характеристик атмосферних викидів.

За даними офіційної екологічної звітності, підприємства металургійного комплексу характеризуються значними сумарними обсягами викидів, які формуються переважно внаслідок високотемпературних технологічних процесів. До складу загальних викидів входять пил та зважені частинки, оксиди азоту й сірки, оксид вуглецю, леткі органічні сполуки та ряд специфічних токсикантів, характерних для металургійних агрегатів. Динаміка викидів залежить від інтенсивності роботи основних цехів, режимів

експлуатації агрегатів, ефективності пилогазоочисного обладнання та впроваджених природоохоронних заходів.

Викиди формуються комплексом технологічних підрозділів, серед яких домінують:

- Агломераційна фабрика (аглофабрика). Є одним з найбільших джерел пилу, оксидів азоту, діоксину та високотоксичних органічних сполук. Процес спікання залізорудної сировини супроводжується утворенням дрібнодисперсних частинок і газоподібних продуктів згоряння.
- Доменні печі. Генерують значні обсяги оксиду вуглецю, оксидів азоту, сірчистого ангідриду та пилу під час продування, завантаження шихти та транспортування доменного газу.
- Конвертерні агрегати. Характеризуються інтенсивними короткочасними викидами під час продувки металу киснем. Основні забруднювачі: пил, оксиди азоту, органічні сполуки, димові шлейфи з високою температурою.
- Коксохімічне виробництво. Є джерелом бензопірену, фенолів, аміаку, оксиду вуглецю, сірководню та летких органічних речовин. Особливо небезпечними є неорганізовані викиди під час завантаження та видачі коксу, а також витоки з газоходів.

Аналіз структури викидів свідчить, що найбільшу екологічну загрозу становлять такі групи речовин як:

- Пил та зважені частинки (PM₁₀, PM_{2.5}). Формуються у великих обсягах під час агломерації, доменного та конвертерного виробництв. Висока дисперсність частинок підвищує ризик їхнього проникнення у органи дихання людини.
- Оксиди азоту (NO_x) та діоксид сірки (SO₂). Утворюються в результаті згоряння палива та високотемпературних процесів. NO_x сприяють

формуванню приземного озону, тоді як SO_2 є кислотоутворювальним компонентом.

- Оксид вуглецю (CO). Є побічним продуктом процесів відновлення заліза та згоряння доменного газу. На великих ділянках виробництва CO виділяється у значних концентраціях.
- Бензопірен та інші поліциклічні ароматичні вуглеводні. Найбільше характерні для коксохімічних процесів; належать до канцерогенів I класу небезпечності.
- Діоксини та фурани. Формуються переважно на аглофабриці; за даними міжнародних досліджень, є одними з найбільш токсичних забруднювачів, що здатні накопичуватися в біосфері.

На сайті підприємства розміщуються оперативні дані Ecomonitoring, що відображають рівні забруднення атмосферного повітря на межі санітарно-захисних зон або у контрольних точках поблизу виробничих майданчиків. Аналіз доступної інформації свідчить про наявність періодичних коливань концентрацій пилу та оксиду вуглецю, які корелюють з інтенсивністю роботи основних агрегатів, підвищені пікові значення забруднювачів під час запусків, ремонтних робіт або нестандартних технологічних режимів, зниження середньорічних значень окремих речовин після модернізації газоочисних систем, наявність відхилень від нормативів у дні з несприятливими метеорологічними умовами, що посилюють накопичення домішок у приземному шарі повітря.

Ecomonitoring дозволяє оперативно відстежувати тенденції та виявляти потенційні порушення, однак його функціональність обмежена доступністю лише частини даних, що вимагає використання комплексних підходів до оцінювання реального рівня забруднення.

2.2.2. Аналіз скидів стічних вод

Система водокористування металургійних підприємств є складною багатокомпонентною структурою, що включає технологічні, господарсько-побутові та умовно чисті стоки. Сталеливарні комбінати, до числа яких належить ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», характеризуються значною водомісткістю виробництва, що зумовлює формування широкого спектра стічних вод різного хімічного складу та ступеня небезпечності. Аналіз скидів є ключовим елементом ідентифікації екологічних ризиків, оскільки якість вод, що повертаються до природних водних об'єктів, визначає рівень техногенного навантаження на довкілля.

На основі відкритих джерел, екологічної звітності та типології металургійних процесів, стічні води підприємства можна поділити на виробничі стічні води які формуються під час роботи коксохімічного, агломераційного, доменного, конвертерного та прокатного виробництв і характеризуються високою концентрацією токсикантів, а саме фенолів, ціанідів, амонійного азоту, нафтопродуктів, завислих часток та важких металів.

Умовно чисті стоки що утворюються переважно в системах охолодження агрегатів, містять мінімальну кількість домішок, переважно продукти корозії та дрібнодисперсні частинки.

Господарсько-побутові стоки мають стандартний санітарний склад і підлягають біологічному очищенню.

Кожна технологічна ділянка підприємства формує стоки зі специфічним хімічним складом:

Коксохімічне виробництво – найбільш екологічно небезпечне джерело; стоки містять феноли, тіоціанати, амонійні солі, бензолні фракції, нафтопродукти, ціаніди, поліциклічні ароматичні вуглеводні. Саме ці стоки формують основне токсичне навантаження на очисні споруди.

Агломераційний цех – стоки характеризуються високим вмістом завислих речовин, карбонатів, оксидів заліза та марганцю.

Доменне виробництво – стоки насичені шламом, нафтопродуктами, суспензією оксидів металів; можливе підвищення температури води.

Конвертерний цех – характерні залізовмісні завислі частки, продукти окиснення металів, нафтопродукти.

Прокатні цехи – формують стоки, що містять мастильно-охолоджувальні рідини, окалину, емульсії, ПАР.

За даними екологічних звітів та узагальненими даними для металургійної галузі, у стічних водах підприємства типово виявляються: завислі речовини (шлами, окалина, дрібнодисперсні метали), нафтопродукти (емульговані та вільні), феноли та СПАР (поверхнево-активні речовини), амонійний азот, нітрити, нітрати, ціаніди, тіоціанати, важкі метали: Fe, Mn, Zn, Pb, висока мінералізація (сульфати, хлориди, карбонати), ПАВ та органічні сполуки, характерні для МОРів.

Такий склад зумовлює потребу у багатоступеневому очищенні з обов'язковим застосуванням хімічних, фізико-хімічних та біологічних методів.

Система очищення ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» включає:

- механічне очищення (піскоуловлювачі, нафтозбірники, відстійники);
- фізико-хімічні методи (коагуляція, флокуляція, нейтралізація реагентами);
- біологічне очищення – переважно для коксохімічних стоків;
- замкнені оборотні цикли водопостачання, що дозволяють зменшити загальний обсяг скидів;
- шламові майданчики та ставки-відстійники для акумулювання твердих часток;
- моніторинг температурного режиму води, що є критичним показником для охолоджувальних контурів.

У відкритих звітах згадується, що технічний стан окремих очисних споруд потребує модернізації, зокрема на коксохімічному виробництві, де концентрації токсикантів інколи наближаються до гранично допустимих.

Порівняння контрольних показників з нормативами засвідчує: періодичні перевищення вмісту амонійного азоту, фенолів та нафтопродуктів; залежність концентрацій забруднювачів від режимів роботи цехів; високий рівень ризику токсичного навантаження у разі аварійних або залпових скидів; значний вплив на якість води у річках Інгулець та Саксагань у зонах потенційного водокористування. І несуть такі екологічні ризики як евтрофування водних об'єктів, токсичну дію ціанідів та фенольних сполук на гідро біонтів, накопичення важких металів у донних відкладах, ризики для питного водопостачання населення.

Підприємство здійснює моніторинг таких показників:

- рН, температура, мінералізація;
- концентрації фенолів, амонійного азоту, нафтопродуктів та завислих часток;
- рівні важких металів;
- відповідність нормативам ГДС.

Відкриті дані свідчать про поступову тенденцію до зменшення сумарних обсягів скидів завдяки збільшенню частки оборотного водопостачання, проте очисні споруди не повністю відповідають сучасним екологічним вимогам.

2.2.3. Аналіз твердих промислових відходів

Промислові відходи металургійного виробництва ПАТ «ArcelorMittal Кривий Ріг» формуються на всіх основних стадіях технологічного циклу й характеризуються значними обсягами утворення, високою мінералізованістю та наявністю металовмісних компонентів. Структура відходів відображає специфіку доменного, сталеплавильного, агломераційного та допоміжних

виробництв, що визначає необхідність їх системного обліку, класифікації та екологічно безпечного поводження.

Основні види відходів металургійного виробництва

Доменний шлак що утворюється в процесі виплавки чавуну під час видалення пустої породи та золи коксу. За хімічним складом містить CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO . Відноситься до малонебезпечних неорганічних відходів, може бути гранульованим або кусковим. Підприємство традиційно продукує значні обсяги доменного шлаку, який є цінною вторинною сировиною.

Сталеплавильний (конвертерний) шлак, містить оксиди заліза, марганцю, кальцію, домішки фосфору та сірки. Характеризується підвищеною лужністю та здатністю до самонагрівання. Вимагає спеціальних умов складування та контролю параметрів.

Пил аглофабрики, утворюється при спіканні залізородної сировини. Містить оксиди заліза, оксиди кремнію, іноді сполуки свинцю та цинку. Часто повертається у технологічний процес як возврат.

Шлами газоочищення, формуються при очищенні доменних, конвертерних і агломераційних газів. За складом багаті на дрібнодисперсний Fe_2O_3 і можуть мати високі концентрації важких металів. Зазвичай накопичуються в шламонакопичувачах.

Будівельні, ремонтні та допоміжні відходи. До яких належать бетонні фрагменти, ізоляційні матеріали, деревина, тара та відходи технічного обслуговування обладнання. Питома вага менша, але вони потребують сортування та відповідного поводження.

У сучасній практиці ПАТ «ArcelorMittal Кривий Ріг» застосовує низку заходів для повернення металовмісних компонентів у виробництво та залучення шлаків до ресурсного циклу. До основних напрямів утилізації належать:

Використання доменного та сталеплавильного шлаку у будівельній галузі. А саме виробництво щебеню та цементу; заміна природних нерудних матеріалів; використання у дорожньому будівництві для основ і підоснов автомобільних доріг. Згідно з практикою підприємства, до 80% доменного шлаку може бути залучено до повторного використання.

Утилізація шламів газоочищення через повернення металовмісних шламів у агломераційний процес, використання зневоднених шламів у виробництві брикетів («окиснені брикети»). Це знижує втрати заліза й зменшує потребу у первинній сировині.

Переробка пилу аглофабрики застосовуючи як добавки у шихту, брикетування для підвищення технологічних характеристик. Висока металовмісність пилу робить його економічно доцільним для повернення у цикл.

Утилізація будівельних та допоміжних відходів через подрібнення бетонних фрагментів для подальшого використання, передача вторсировини ліцензованим підприємствам та сортування та мінімізація утворення змішаних відходів.

Основними екологічними ризиками, які пов'язані з поводженням з твердими відходами є:

- утворення значних площ відвалів, що спричинює деградацію земельних ресурсів;
- пиління відкритих шлакових відвалів і вторинне забруднення атмосферного повітря;
- потенційне вимивання важких металів зі шламів, що може становити небезпеку для ґрунтових та поверхневих вод;
- термічна нестабільність сталеплавильного шлаку, здатність до самонагрівання;

- накопичення відходів газоочищення, що потребують спеціальних методів зневоднення та стабілізації.

Попри значні обсяги утворення, велика частина відходів залучається до вторинного використання — у виробництві цементу, дорожньому будівництві, як компонент шихти чи брикетів. Це дає змогу зменшити антропогенний тиск на довкілля та підвищити ресурсну ефективність підприємства. Водночас низка екологічних ризиків, пов'язаних із пилінням, вимиванням забруднювачів та накопиченням шламів, потребує постійного контролю та впровадження сучасних методів утилізації й мінімізації впливів.

2.2.4. Оцінка екологічних ризиків та їхнього впливу

Діяльність ПАТ «ArcelorMittal Кривий Ріг», яка включає агломераційне, доменне, сталеплавильне та прокатне виробництво, формує комплексний вплив на довкілля. Екологічні ризики підприємства мають багатокomпонентний характер і охоплюють атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, а також соціально-екологічні аспекти, що визначає необхідність їх комплексної оцінки.

Атмосферне повітря є найбільш чутливим компонентом довкілля Криворізького промислового району, а вплив металургійного виробництва залишається одним із ключових факторів формування регіонального забруднення. Основні ризики включають:

- Високі концентрації пилу та зважених частинок (PM_{10} , $PM_{2.5}$), що утворюються в процесах агломерації, доменної плавки та транспортування сировини. Пилкові частинки можуть містити оксиди заліза, марганцю, свинцю та інші металеві домішки.
- Викиди оксидів азоту (NO_x), сірки (SO_2) та оксиду вуглецю (CO), які формують ризики утворення вторинних аерозолів і кислотних опадів.

- Поліциклічні ароматичні вуглеводні, зокрема бенз(а)пірен, який є канцерогенним і утворюється переважно на коксохімічних установках.
- Періодичні викиди діоксинів і фуранів у процесах високотемпературного спалювання газів аглофабрики.

З урахуванням рози вітрів для Кривого Рогу найбільш істотно страждають центральні та північно-східні житлові масиви. Підвищені концентрації пилу та окремих газоподібних забруднювачів відзначаються у спостереженнях міської системи моніторингу та у відкритих даних підприємства.

Головними водними об'єктами, що потенційно зазнають впливу діяльності підприємства, є річка Інгулець, яка традиційно використовується як приймач зворотних вод та Карачунівське водосховище, що відіграє роль у господарсько-питному водопостачанні міста.

Основні екологічні ризики:

- Підвищена мінералізація та вміст завислих речовин у стічних водах після промивання технологічних газів, охолодження обладнання, очищення територій.
- Потрапляння сполук заліза, нафтопродуктів, фенолів, що характерно для водно-шламових потоків агломераційного та коксового виробництва.
- Ймовірність вторинного забруднення підземних вод у зоні старих шламонакопичувачів.

У разі перевищення нормативних показників забруднення у річкових системах можливі зміни хімічного складу, погіршення якості води для населення, евтрофікація та зниження біорізноманіття.

Ґрунти промислових зон є акумуляторами забруднень техногенного походження. Для ПАТ «ArcelorMittal Кривий Ріг» характерні такі ризики:

- Накопичення важких металів (Fe, Mn, Pb, Zn, Cd) у ґрунтах поблизу аглофабрики та доменного цеху.
- Пилове перенесення шлаків і шламів із відкритих карт складування, що спричиняє вторинне забруднення прилеглих ландшафтів.
- Вплив фугитивних (неорганізованих) викидів із транспортних шляхів та відкритих виробничих поверхонь.
- Потенційна токсичність сталеплавильного шлаку, який може включати сполуки ванадію, хрому, нікелю.

Ґрунтове забруднення становить довготривалий ризик, оскільки важкі метали мобільні в умовах кислих ґрунтів та можуть надходити до рослинності, ґрунтових вод і трофічних ланцюгів.

Також окремої уваги потребують соціально-екологічні наслідки. За даними досліджень у промислових регіонах України, включаючи Кривий Ріг, підвищені рівні $PM_{2.5}$, бенз(а)пірену та SO_2 асоціюються зі зростанням частоти респіраторних захворювань, алергічних реакцій, серцево-судинних патологій. Найбільш чутливими групами є діти, літні люди та особи з хронічними хворобами.

Не мало важливим є вплив на зелені насадження та міські екосистеми. Фітотоксичні ефекти оксидів сірки та азоту включають хлороз листя, пригнічення росту та зниження біорізноманіття насаджень у промислових районах. Осідання пилу порушує фотосинтез і сповільнює відновлення рослинності.

На фоні цього не є виключенням екологічні конфлікти та соціальне напруження. Регулярні перевищення концентрацій забруднювачів у повітрі та випадки аварійних викидів призводять до формування соціального незадоволення серед населення, зростання кількості скарг, публічних дискусій і звернень громадських організацій. Питання екологічної безпеки є

однією з основних тем екологічного моніторингу та громадського контролю у місті.

Отже, екологічні ризики, пов'язані з діяльністю ПАТ «ArcelorMittal Кривий Ріг», є комплексними та охоплюють атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти та соціально-екологічну сферу. Найбільш суттєвим є вплив на якість атмосферного повітря, що формує ризики для здоров'я населення і природних екосистем. Водні ресурси зазнають впливу стічних вод із підвищеною мінералізацією та металовмісними домішками. Ґрунти у промисловій зоні є вразливими до накопичення важких металів та пилових відкладень. Соціально-екологічні наслідки проявляються у зростанні громадського занепокоєння та посиленні екологічного контролю.

Підсумовуючи підпункт 2.2 проведений аналіз дає підстави стверджувати, що діяльність АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» характеризується комплексним та багаторівневим впливом на довкілля, який охоплює атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти та техногенно навантажені території. Встановлено, що структура джерел забруднення відповідає типовим для повного металургійного циклу підприємств, однак масштаби емісій та обсяг утворюваних відходів зумовлюють підвищений рівень екологічних ризиків.

Аналіз викидів у атмосферне повітря показав, що домінуючими джерелами негативного впливу є агломераційне, доменне, конвертерне та коксохімічне виробництва, які формують найбільші обсяги пилу, оксидів азоту, сірки, монооксиду вуглецю, органічних сполук і специфічних токсикантів. Дані автоматизованих станцій екологічного моніторингу свідчать про періодичні перевищення концентрацій пилових фракцій PM_{10} – $PM_{2.5}$ та бензопірену у прилеглих житлових зонах, що створює ризики для громадського здоров'я та довгострокової екологічної безпеки.

У сфері водокористування встановлено, що підприємство формує змішані за складом стічні води, які містять завислі речовини, сполуки заліза, нафтопродукти, феноли та хлориди. Незважаючи на функціонування оборотних циклів водопостачання, технічні та промислові стоки залишаються значущим джерелом навантаження на річку Інгулець та систему місцевих водосховищ, особливо у періоди промивних скидів. Це зумовлює потенційні ризики вторинного забруднення, евтрофікації та деградації водних екосистем.

Аналіз поводження з твердими промисловими відходами – зокрема, доменних і сталеплавильних шлаків, агломераційного пилу та шлаків – показав, що підприємство володіє значним ресурсним потенціалом для їх вторинного використання. Водночас частка фактичної утилізації залишається нижчою за доступні технологічні можливості, а накопичувальні майданчики створюють ризики забруднення ґрунтів, міграції забруднювачів у підземні води та фізичного порушення ландшафтів.

Комплексна оцінка екологічних ризиків засвідчує, що найбільш критичним є вплив на атмосферне повітря та здоров'я населення, особливо в районах, що межують із проммайданчиком. До соціально-екологічних наслідків належать підвищені показники респіраторних захворювань, дискомфортне середовище проживання, погіршення стану зелених насаджень та виникнення локальних екологічних конфліктів між громадою та підприємством.

Таким чином, результати підрозділу 2.2 підтверджують необхідність системного управління екологічними ризиками, модернізації природоохоронного обладнання, підвищення прозорості екологічного моніторингу та поглибленої інтеграції підприємства у систему сталого розвитку регіону.

2.3. Аналіз діючих природоохоронних технологій на підприємстві

2.3.1. Технології очищення викидів

Система очищення викидів на АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

характеризується багатокомпонентною структурою, що охоплює комплекс газоочисного обладнання, модернізовані аспіраційні системи та технології зниження концентрації основних забруднювачів. З огляду на масштаби металургійного виробництва, підприємство експлуатує широкий спектр установок різних типів, орієнтованих на мінімізацію пилових та газових викидів. Види газоочисного обладнання

1. Аспіраційні системи локального відсмоктування. Використовуються переважно у зонах завантаження, пересипання та транспортування сировини. Забезпечують локалізацію пилу та його направлення на подальше очищення. На агломераційній фабриці та у конвертерному цеху встановлені високопродуктивні аспіраційні зони, обладнані герметичними укриттями, що дає змогу зменшити неорганізовані викиди.
2. Рукавні фільтри (тканинні фільтрувальні установки). Рукавні фільтри є ключовим елементом пилогазоочищення, особливо після модернізацій 2018–2023 рр. На підприємстві впроваджено декілька великих рукавних фільтрів на аглофабриці та у конвертерному виробництві. Їхня ефективність уловлювання становить до 99 % дрібнодисперсного пилу, включно з частинками PM_{10} .
3. Електрофільтри (електростатичні пиловловлювачі). Застосовуються на доменних і агломераційних процесах для уловлювання пилу з великих обсягів гарячих газів. Модернізовані електрофільтри забезпечують скорочення концентрації пилу у викидах до 50–100 мг/м³, що відповідає чинним нормативам.
4. Мокрі скрубери. Використовуються у коксохімічному виробництві для очищення газів від смол, бензолу та аміачних сполук. Установки типу Вентурі дозволяють ефективно знижувати емісії вологих та липких частинок, які важко уловлюються сухими методами.

5. Системи десульфурзації (очищення від оксидів сірки). На окремих ділянках доменного виробництва впроваджено системи часткового уловлювання SO₂ на основі мокрогочиснення із застосуванням лужних розчинів. Ефективність таких установок за даними підприємства досягає 70–85 % зниження концентрацій SO₂ у газах

За останні роки підприємство здійснює поетапну модернізацію газоочистки відповідно до корпоративної екологічної стратегії та вимог національного законодавства. Найважливішими проектами є:

- Реконструкція газоочисних систем агломераційної фабрики (2019–2021): заміна застарілих електрофільтрів на сучасні рукавні фільтри, встановлення додаткових аспіраційних вузлів та герметизація транспортних комунікацій.
- Модернізація газоочистки конвертерів №1–3 (2020–2023): впровадження потужних рукавних фільтрів, що знизили викиди пилу в 5–7 разів, а також будівництво нових систем уловлювання вторинних газів.
- Оновлення газоочистки на доменних печах (2021–2022): модернізація електрофільтрів, оновлення систем подачі повітря та удосконалення вологого очищення газів.
- Коксохімічне виробництво (2018–2022): впровадження нових скрубєрних систем для очищення коксового газу, заміна газоочисних апаратів для уловлювання смолистих речовин.

Аналіз відкритих звітів підприємства, а також даних з автоматизованих постів моніторингу показує, що модернізовані газоочисні установки суттєво скорочують концентрації пилових частинок і газових забруднювачів. Зокрема після реконструкції аглофабрики рівень пилу у викидах зменшився в середньому на 40–60 %. Оновлення аспірації конвертерного виробництва дало змогу скоротити фактичні викиди пилу більш ніж удвічі. Поступове

оновлення систем очищення коксохіму привело до зменшення емісій smol та фенольних сполук на 15–20 %.

Разом із тим, результати моніторингу свідчать, що попри значну модернізацію, сумарний екологічний ефект залишається недостатнім, оскільки загальні обсяги викидів залежать не лише від ефективності фільтрів, а й від технологічного навантаження підприємства, стану окремих агрегатів та обмежених можливостей зниження організованих і неорганізованих викидів у пікові періоди роботи.

2.3.2. Системи очищення й підготовки води

Водогосподарський комплекс АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є одним із найбільших у металургійній галузі України та функціонує на основі поєднання оборотних водних циклів, механічних і фізико-хімічних методів очищення, а також спеціалізованих водоохоронних споруд. Система очищення води спрямована на мінімізацію споживання свіжої води та зменшення потенційного навантаження на водні об'єкти регіону.

Основою водокористування підприємства є великотоннажні оборотні системи, які забезпечують багаторазове використання промислової води без значного її скидання у природні водойми. Згідно з офіційними даними, частка оборотного водопостачання на підприємстві становить понад 90 % від загального обсягу водовикористання, що відповідає сучасним екологічним вимогам до металургійних підприємств. Оборотні цикли застосовуються у таких технологічних процесах як охолодження доменних та конвертерних агрегатів, охолодження коксових батарей, газоочистка та мокре пиловловлювання, тепло забезпечення окремих технологічних ділянок та утримання гідравлічних систем і насосного обладнання.

Важливою складовою є водосховища-охолоджувачі та бризкальні басейни, які забезпечують зниження температури оборотної води. Така система

дозволяє скорочувати потребу у свіжій воді з р. Інгулець і Карачунівського водосховища та одночасно зменшує ризики теплового забруднення довкілля.

Система очистки води на підприємстві включає механічні, фізико-хімічні та комбіновані методи очищення

1. Механічне очищення зазвичай використовується як первинна стадія. Решітки та сита для затримання грубих домішок, пісковловлювачі для осадження піщаних фракцій та відстійники з мулоуловлювачі для вилучення завислих частинок. Таким чином механічне очищення забезпечує до 60–70 % зниження концентрації зважених речовин.
2. Фізико-хімічне очищення застосовується для видалення важкорозчинних та колоїдних домішок, зокрема: коагуляція та флокуляція для укрупнення дрібних частинок шламів, нейтралізація стічних вод доменних і сталеплавильних цехів, сорбційні процеси (за потреби) для вилучення фенолів, нафтопродуктів та органічних сполук, дефосфатація вод після агломераційних процесів, деемульгація у коксохімічному виробництві.
3. При комбінованих методах перевагу віддають відцентровим гідроциклонам для видалення дрібнодисперсних домішок, флотації (зокрема напірна) для вилучення нафтопродуктів і смолистих речовин та шламовим басейнам з подальшим зневодненням осадів.

Загалом, поєднання механічних і фізико-хімічних методів забезпечує доведення якості води до рівня, придатного для повторного використання в оборотних системах або скидання на подальше доочищення.

2.3.3. Управління промисловими відходами

Управління промисловими відходами на металургійному підприємстві є ключовим елементом системи екологічної безпеки та значною мірою визначає рівень впровадження принципів циркулярної економіки. АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» генерує значні обсяги твердих відходів різного

походження – доменних та сталеплавильних шлаків, пилу агломераційного виробництва, шламів газоочищення, відходів коксового та допоміжних виробництв. Ефективне управління цими потоками відходів вимагає поєднання технологічних, організаційних та екологічних заходів, що відповідають сучасним стандартам ЄС та національному законодавству України.

На підприємстві функціонують локальні та централізовані системи збору відходів, які забезпечують розділення потоків залежно від їхнього походження та фізико-хімічних властивостей. Зокрема:

- Доменні та сталеплавильні шлаки транспортуються у шлакові відвали або на пункти грануляції;
- Пил аглофабрики та пил газоочистки збирається у бункери через аспіраційні системи;
- Шлами газоочищення накопичуються у шламонакопичувачах та картах зневоднення;
- Відходи коксового виробництва збираються окремо з урахуванням їхньої токсичності (фенольні, смолисті залишки тощо).

Зберігання відходів здійснюється на спеціально облаштованих полігонах та у шламонакопичувачах, що відповідають вимогам екологічної безпеки, включаючи заходи контролю фільтрації, санітарно-захисні зони та моніторинг ґрунтових вод. Однак, з огляду на значні обсяги накопичених техногенних відходів, важливою проблемою залишається просторове перенавантаження шламонакопичувачів та шлакових відвалів.

АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» впроваджує практики переробки доменних та сталеплавильних шлаків відповідно до найкращих доступних технологій (ВАТ). Основні напрями утилізації включають виробництво гранульованого шлаку для цементної промисловості; використання шлаків як щебеневої продукції у дорожньому будівництві; застосування металургійних шлаків у

будівельних розчинах, бетонах, основах під автошляхи та вилучення металевої фракції шляхом магнітної сепарації.

Доменний шлак за своєю природою є гідравлічним матеріалом, а тому може замінювати до 30–70 % клінкеру в цементі, що суттєво зменшує вуглецевий слід будівельної галузі. Сталеплавильний шлак, завдяки високій міцності, застосовується переважно як щебінь та заповнювач для дорожнього полотна та залізобетонних конструкцій

Пил агломераційного та сталеплавильного виробництва містить значні концентрації заліза, марганцю та інших металів, тому є цінною вторинною сировиною. На підприємстві застосовуються практики поводження з пилом і шламами, а саме брикетування та окускування шламів, що дозволяє повертати їх у доменний або агломераційний процес; сушіння шламів перед утилізацією або повторним введенням у технологічний цикл; використання пилу газоочистки як добавки до шихти; експериментальні технології пірометалургійного відновлення цінних компонентів. Такі процеси дозволяють зменшити обсяг відходів, одночасно підвищуючи ефективність використання природних ресурсів. .

Управління відходами на підприємстві має значний потенціал розвитку в контексті переходу до циркулярної економіки. До основних напрямів інтеграції входять: повернення шламів та пилу у металургійний цикл (замкнені матеріальні потоки); виробництво шлаколузжних цементів і геополімерних матеріалів на основі доменних шлаків; використання шлаків у рекультивації техногенно порушених територій; співпрацю з будівельними та дорожніми компаніями щодо збільшення використання шлакових матеріалів; можливий розвиток технологій біовилуговування металів зі шламів у перспективних інноваційних проєктах. Саме інтеграція відходів у циркулярні моделі сприяє одночасному зменшенню екологічного навантаження,

зниженню витрат на утилізацію та створенню доданої вартості у суміжних галузях.

2.3.4. Системи моніторингу довкілля

Системи моніторингу довкілля, які функціонують на металургійному підприємстві, відіграють ключову роль у забезпеченні контролю за впливом виробництва на атмосферне повітря, водні ресурси та ґрунтове середовище. Їхня структура охоплює як автоматизовані засоби контролю, так і лабораторні та зовнішні форми взаємодії з державними органами нагляду.

На підприємстві встановлено низку автоматизованих станцій моніторингу атмосферного повітря, які працюють у режимі реального часу. Такі станції зазвичай обладнані високочутливими аналізаторами для вимірювання концентрацій пилу (PM₁₀, PM_{2.5}), діоксиду сірки (SO₂), оксидів азоту (NO_x), оксиду вуглецю (CO), бензолу та формальдегіду (за наявності відповідного обладнання). Результати автоматизованого моніторингу передаються у централізовану систему збору даних, що дає змогу:

- Забезпечувати оперативний контроль за змінами якості повітря;
- Своєчасно реагувати на аварійні чи пікові викиди;
- Формувати добові, тижневі та річні аналітичні звіти.

Наявність Екомоніторингових станцій свідчить про перехід підприємства від епізодичного зондування до безперервного цифрового екоконтролю, що відповідає сучасним природоохоронним стандартам.

Також внутрішні екологічні лабораторії підприємства проводять систематичні вимірювання, таких як контроль параметрів атмосферних викидів безпосередньо на джерелах (труби, газоходи); аналіз якісного складу стічних вод, включаючи визначення завислих речовин, заліза, нафтопродуктів, сульфатів, важких металів; дослідження ґрунтів у санітарно-захисній зоні та вимірювання рівнів шуму та вібрації. Для аналітичних

вимірювань використовуються сучасні методи: атомно-абсорбційна спектрометрія, газова хроматографія, спектрофотометрія тощо. Регулярність лабораторних досліджень визначається екологічними регламентами та технологічними інструкціями.

Варто зазначити що підприємство також співпрацює з державними органами контролю, а саме з:

- Державна екологічна інспекція України;
- Державна служба з надзвичайних ситуацій (у частині хімічної безпеки);
- Органи місцевого самоврядування й екологічні департаменти ОДА.

В рамках цієї співпраці проводяться спільні заміри викидів і скидів, проводяться перевірки дотримання природоохоронного законодавства, надається необхідна документація та звіти та береться участь у виконанні регіональних екологічних програм, наприклад, програм покращення якості повітря в місті. Ця діяльність сприяє узгодженню корпоративного екоконтролю з державними нормами та принципами екологічної відповідальності.

Сучасні вимоги екологічного менеджменту передбачають відкритість і прозорість інформації. Підприємство забезпечує публічний доступ до вибіркового екологічних даних шляхом розміщення звітів у відкритих ресурсах (сайтах підприємства чи екопорталах міста) і оприлюднює щорічні екологічні звіти, також взаємодіють з громадськістю та місцевими організаціями та за можливості публікують оперативні данні із автоматизованих станцій моніторингу. Адже доступність екологічної інформації підсилює довіру населення, покращує взаємодію з громадою та є одним із принципів сталого розвитку.

2.3.5. Ефективність впровадження заходів

Оцінка ефективності природоохоронних заходів на металургійному підприємстві є ключовою складовою екологічного менеджменту, оскільки дозволяє визначити результати модернізацій, виявити недоліки чинних систем та сформулювати рекомендації щодо подальшого вдосконалення екотехнологій. Аналіз проводиться на основі зіставлення динаміки викидів, оцінювання реалізованих екопроектів, а також дослідження наявних проблем та потенціалу для інновацій.

За останні роки підприємство демонструє тенденцію до скорочення окремих видів забруднюючих речовин, що є наслідком впровадження нових газоочисних систем, реконструкції агрегатів та оптимізації технологічних режимів. Зокрема:

- спостерігається зменшення пилових викидів завдяки встановленню сучасних рукавних фільтрів та модернізації аспіраційних систем;
- скорочення викидів оксидів сірки (SO_2) унаслідок використання мокрих скрубєрів та систем часткової десульфурації;
- зменшення емісії оксидів азоту (NO_x) через впровадження регулювання температурних режимів та встановлення більш ефективних палинкових пристроїв;
- зниження рівнів викидів летких органічних сполук (ЛОС) у межах допоміжних виробництв.

Хоча загальна динаміка може бути позитивною, скорочення відбувається нерівномірно, а окремі види забруднень залишаються на високому рівні через технологічні особливості виробництва.

Підприємством реалізовано низку екологічних проектів, спрямованих на модернізацію інфраструктури та мінімізацію впливу на довкілля, серед яких реконструкція доменних та агломераційних газоочисних систем із встановленням високоефективних рукавних фільтрів, впровадили оборотні водні цикли та оновили насосно-фільтраційне обладнання, модернізація

шламового господарства з підвищенням ступеня вилучення твердих частинок із шламових вод, запусти системи автоматизованого моніторингу повітря та стічних вод, запустили проекти з утилізації доменних газів та підвищення енергоефективності технологічних агрегатів. У більшості випадків такі проекти дозволили скоротити технологічні втрати, зменшити навантаження на довкілля та підвищити ефективність виробничих процесів.

Попри значний прогрес, низка обмежень продовжує впливати на загальний екологічний результат через застарілість частини обладнання, що працює на межі технічної ефективності; високий рівень пилових навантажень на агломераційному виробництві, де модернізація реалізується поетапно; значні обсяги накопичених промислових відходів, які потребують подальшої утилізації або переробки; обмежена ефективність мокрих систем очищення, особливо під час пікових навантажень; недостатня автоматизація в частині водоочищення, що ускладнює контроль за якістю стоків у реальному часі; залежність від зовнішніх екологічних чинників, зокрема від географічних та метеорологічних умов регіону, які впливають на розсіювання викидів.

Ці фактори обмежують екологічну результативність і вимагають подальших модернізацій.

Але підприємство має значні можливості для подальшого підвищення екологічної ефективності, якщо перейти до більш глибоких технологій очищення газів, включаючи багатоступеневі системи фільтрації та сучасні методи десульфурації, масштабувати замкнені водооборотні системи, що дозволить знизити водозабір та скоротити скиди, продовжувати розвивати технології переробки та вторинного використання шлаків, пилу та металургійних шлаків у межах циркулярної економіки, також впровадити цифрові системи екологічного контролю, зокрема IoT-сенсорів, систем прогнозування викидів, штучного інтелекту для аналізу виробничих даних та провести енергетичну модернізацію (утилізація тепла відхідних газів, зниження енерговитрат агрегатів), що одночасно зменшить викиди CO₂.

Перспективи впровадження нових технологій дозволять підприємству адаптуватися до сучасних екологічних стандартів ЄС та підвищити рівень екологічної безпеки у регіоні.

Аналіз діючих природоохоронних технологій на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» свідчить про наявність комплексної системи екологічного менеджменту, яка охоплює очищення викидів, водопідготовку, поводження з промисловими відходами та моніторинг довкілля. Модернізація газоочисних установок, впровадження оборотних водних циклів, розвиток технологій переробки металургійних відходів та функціонування автоматизованих станцій моніторингу формують базу для поступового зниження рівня техногенного навантаження на навколишнє середовище.

У межах газоочистки підприємство демонструє тенденцію до впровадження сучасних рішень — рукавних фільтрів, електрофільтрів, електроаспіраційних систем, скрубєрів та елементів десульфурації. Ці технології забезпечують помітне скорочення пилових викидів та часткове зменшення емісій газоподібних забруднювачів. У системах водопідготовки ключову роль відіграє використання замкнених оборотних циклів та поетапна модернізація механічного та фізико-хімічного очищення, що дозволяє мінімізувати скиди та покращувати якість стічних вод.

У сфері управління відходами підприємство реалізує підходи, орієнтовані на циркулярну економіку: переробку шлаків у будівельні матеріали, повторне повернення шлаків у виробничий цикл, зменшення обсягів відходів, що потребують захоронення. Паралельно з цим функціонують системи лабораторного та автоматизованого моніторингу, що забезпечують контроль ключових параметрів повітря, води та відходів.

Водночас ефективність цих заходів залишається нерівномірною: частина обладнання потребує модернізації, обсяг накопичених відходів залишається значним, а рівні деяких викидів — все ще високими. Це формує потребу у

подальшому оновленні технологій, цифровізації екологічного контролю та розширенні екологічних інвестицій.

Загалом, впроваджені природоохоронні технології створюють підґрунтя для підвищення екологічної безпеки виробництва, проте потребують системного удосконалення, відповідно до сучасних вимог сталого розвитку та екологічного законодавства ЄС.

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»

3.1.1. Основні проблеми функціонування діючих систем екологічного захисту

Аналіз існуючих природоохоронних систем металургійного підприємства свідчить, що попри значну модернізацію останніх років, їх ефективність залишається обмеженою низкою технологічних та організаційних чинників. Найбільш суттєві проблеми можна згрупувати за напрямками впливу на довкілля.

1. Обмежена ефективність частини газоочисного обладнання. Найбільш проблемними є окремі газоочисні установки агломераційного та доменного виробництв. Їхня конструктивна застарілість, зокрема використання мокрих або малоефективних циклонаспіраційних систем, не забезпечує необхідної глибини вилучення пилу та оксидів сірки. У ряді випадків фактична ефективність роботи обладнання не відповідає проектним показникам через зношення, нерівномірність повітряних потоків або недостатній контроль параметрів роботи.

2. Перевищення концентрацій пилу та SO₂ у зонах впливу підприємства. Дані моніторингу атмосферного повітря в прилеглих районах демонструють періодичні перевищення гранично допустимих концентрацій пилу, а також підвищення рівня діоксиду сірки. Це свідчить про те, що наявні системи

очищення газів працюють недостатньо стабільно, а частина викидів має незорганізований характер (просипання матеріалу, нещільності укриттів, фугитивні викиди під час навантажувально-розвантажувальних операцій).

3. Технологічна обмеженість мокрих газоочисних систем. Існуючі мокрі скрубери, що ще збереглися на окремих ділянках, характеризуються високими витратами води, значним утворенням забрудненого шламу та низькою ефективністю вилучення дрібнодисперсного пилю. Їх експлуатація у сучасних умовах не відповідає екологічним вимогам, а модернізація потребує комплексної заміни технології.

4. Низька ефективність локальних очисних споруд та недостатнє застосування сучасних фізико-хімічних методів. Більшість локальних очисних систем функціонує за класичною схемою осадження та фільтрації, що ефективно лише щодо грубодисперсних забруднень. Водночас вилучення іонів важких металів, нафтопродуктів та тонкодисперсних завислих речовин потребує адсорбційних, мембранних або флотаційних технологій, які впроваджуються повільно. Це призводить до періодичного погіршення якості очищеної води та збільшення обсягів утворення мулу.

5. Недостатні темпи впровадження технологій переробки пилю, шламів та шлаків. Попри наявність окремих проєктів з переробки відходів, їх загальний обсяг на підприємстві залишається значним. Лише частина шламів повертається у виробництво у вигляді окускованої продукції, тоді як значна кількість зберігається у відвалах, створюючи ризики вторинного забруднення повітря та ґрунтів. Комплексних рішень для повної утилізації пилю агло- та доменного виробництва поки недостатньо.

3.1.2. Порівняння з міжнародними вимогами та НДТМ (BAT – Best Available Techniques)

Таблиця 2

Напря́м	Вимоги ВАТ (BREF Iron & Steel, 2023)	Фактичний стан на підприємстві	Висновок
Викиди пилу	< 10 мг/м ³ для сучасних рукавних фільтрів та електрофільтрів	Частина агрегатів (особливо агломерація) працює на рівні 20–50 мг/м ³	Значне відставання від ВАТ; потреба модернізації фільтрів
SO ₂	Використання систем десульфурації та малосірчистої сировини	Зафіксовано періодичне перевищення ГДК у зоні впливу підприємства	Недостатня ефективність очищення та залежність від сировини
NO _x	Низькоемісійні пальники, оптимізація режимів згоряння	Реалізовано частково; не всі печі модернізовані	Потребує оновлення печей та систем спалювання
Очищення вод	Замкнуті цикли, видалення завислих речовин < 10 мг/л, сучасні фізико-хімічні методи	Часткові замкнуті цикли; завислі речовини 15–40 мг/л, локальні системи застарілі	Відставання від ВАТ; необхідність модернізації ЛОС
Переробка пилу, шламів, шлаків	Максимальна утилізація (брикетування, грануляція, повернення у виробництво)	Переробка здійснюється частково; значні обсяги зберігаються у відвалах	Невідповідність сучасним ВАТ у сфері циркулярної економіки
Моніторинг	Повні автоматизовані системи СЕМС на всіх ключових джерелах	АВС встановлено не на всіх джерелах; частина контролю — періодичні вимірювання	Потребує повної автоматизації та інтеграції даних

Порівняння фактичних екологічних показників ПРАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з вимогами ВАТ (BREF Iron & Steel Production, 2023)

Порівняння діючих технологій екологічного захисту ПРАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» із вимогами найкращих доступних технологій ЄС (ВАТ) демонструє наявність суттєвих розбіжностей у ключових напрямках охорони довкілля. Зокрема, у сфері очищення викидів в атмосферу ефективність частини газоочисних установок, зокрема на агломераційному виробництві, істотно відстає від рівнів, визначених стандартами ВАТ. У той час як сучасні установки мають забезпечувати показник пилу на рівні <10 мг/м³, фактичні значення на окремих агрегатах залишаються у межах 20–50 мг/м³, що свідчить про застарілість устаткування та необхідність модернізації.

Аналогічна ситуація характерна для очищення вод. Європейські стандарти передбачають максимально замкнуті водооборотні цикли та мінімальний вміст завислих речовин (<10 мг/л), тоді як фактичні показники підприємства є вищими, а система локальних очисних споруд місцями не відповідає сучасним технічним вимогам. Це зумовлює підвищене навантаження на водні ресурси регіону та потребу у впровадженні сучасних фізико-хімічних методів підготовки вод.

Особливо помітним є відставання від ВАТ у сфері поводження з відходами металургійного виробництва. Європейські підприємства практикують майже повну утилізацію пилу, шламів та шлаків за рахунок брикетування, грануляції та повернення у технологічний цикл. У випадку АМКР значні обсяги таких матеріалів продовжують накопичуватися у відвалах, що створює додаткові ризики для довкілля та суперечить принципам циркулярної економіки.

Окремо слід відзначити недостатній рівень автоматизації екологічного моніторингу. Відповідно до ВАТ, підприємства мають забезпечувати повний комплекс СЕМС на всіх основних джерелах викидів, що дозволяє здійснювати безперервний контроль у реальному часі. На підприємстві така

система функціонує не повністю, що ускладнює оперативне реагування на екологічні ризики.

Таким чином, порівняння діючих технологій з міжнародними стандартами підтверджує об'єктивну потребу масштабної модернізації екологічної інфраструктури підприємства.

3.1.3. Екологічні та економічні ризики у разі відсутності модернізації

Відсутність модернізації екологічної інфраструктури ПРАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» створює низку істотних ризиків, які здатні вплинути не лише на природне середовище Криворізького промислового регіону, але й на економічні показники діяльності підприємства та його конкурентоспроможність на міжнародному ринку.

1. Зростання техногенного навантаження на атмосферу Криворіжжя. За збереження існуючого стану, рівень викидів пилу, оксидів азоту, оксидів сірки та органічних сполук залишиться стабільно підвищеним. Через старіння газоочисних установок їхня ефективність буде поступово зменшуватися, що призведе до збільшення концентрацій пилу та дрібнодисперсних частинок PM_{10} – $PM_{2.5}$, зростання ризиків виникнення епізодів смогу, розширення зони розсіювання забруднювачів з агломераційного та доменного виробництва. У регіоні, де вже фіксуються перевищення ГДК, це формує довготривалі негативні тенденції для стану атмосфери.

2. Підвищення соціальної напруги та подальше зниження індексів якості повітря. Погіршення показників якості повітря спричинить зростання кількості скарг населення, активізацію екологічних громадських рухів, збільшення числа контрольних перевірок, зниження довіри до підприємства. У випадку Кривого Рогу подібні процеси вже мали місце, тому збереження негативної динаміки посилить соціальну напругу та погіршить репутацію підприємства як екологічно небезпечного об'єкта.

3. Зростання штрафів, екологічного податку та витрат на компенсаційні заходи. Невиконання норм щодо викидів і скидів неминуче призведе до підвищення екологічного податку, збільшення штрафів за перевищення лімітів та порушення природоохоронного законодавства, витрат на компенсаційні програми для громади або озеленення територій, додаткових вимог до модернізації, накладених контролюючими органами. З практики металургійних підприємств України, такі витрати щороку можуть зростати на 10–30%, особливо при посиленні контролю державних органів.

4. Ризики втрати конкурентоспроможності на європейському ринку сталі (СВАМ). Запровадження Carbon Border Adjustment Mechanism (СВАМ) ЄС передбачає застосування вуглецевого мита до продукції з країн, де рівень викидів CO₂ не відповідає європейським нормам. У разі відсутності модернізації собівартість української сталі для ринку ЄС зростатиме, експорт до ЄС стане менш вигідним або частково втратить рентабельність, можливий перехід покупців до виробників із нижчим вуглецевим слідом. Для підприємства, орієнтованого на зовнішні ринки, це є одним з найбільш критичних ризиків.

5. Зростання технічних і виробничих ризиків, включно з аварійними ситуаціями. Експлуатація застарілого обладнання підвищує ймовірність аварій на газоочисних установках, виходу з ладу аспіраційних систем, проривів або забруднення каналів відведення вод, накопичення надмірних обсягів відходів, здатних спричинити техногенні події. Умови високотемпературних процесів металургії роблять такі ризики особливо небезпечними.

6. Довгострокові екологічні та економічні наслідки. Якщо підприємство не адаптується до сучасних вимог екологічної політики, можливими будуть поступове зростання витрат на підтримку застарілих систем замість їхньої модернізації, погіршення інвестиційної привабливості, обмеження доступу до

міжнародних фінансових інструментів, що підтримують "зелені" технології, посилення екосистемної деградації в регіоні.

Відсутність модернізації природоохоронних технологій на ПРАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» створює критичні ризики екологічного, соціального та економічного характеру, які у комплексі здатні значно вплинути на стійкість та конкурентоспроможність підприємства.

Модернізація в такому контексті виступає не рекомендацією, а необхідною умовою для подальшого розвитку металургійного виробництва в умовах посилення міжнародних екологічних стандартів.

3.2. Удосконалення природоохоронних технологій на підприємстві

3.2.1. Пропозиція 1: Модернізація систем газоочистки аглофабрики на основі високоефективних рукавних фільтрів

Рукавні фільтри (baghouse filters) є однією з найефективніших технологій очищення газових потоків від пилу у металургійному виробництві.

Забруднене повітря подається у фільтр через колектор, де тверді частинки уловлюються на поверхні спеціальних рукавів із полімерних або скловолоконних матеріалів. Періодично система здійснює імпульсне струшування (пневмоімпульс або зворотній потік повітря), що дозволяє видаляти накопичений пил у нижній бункер. Такий режим забезпечує стабільний опір фільтра та постійну ефективність очищення. Технологія працює у широкому діапазоні температур і характеризується високою надійністю та простотою обслуговування.

Сучасні рукавні фільтри забезпечують надзвичайно високий рівень уловлювання пилу — до 5 мг/м³, що відповідає найкращим світовим практикам і перевищує вимоги більшості чинних нормативів. Порівняно з існуючими електрофільтрами або циклонами, ефективність може зрости у 5–10 разів. Також технологія дозволяє стабільно підтримувати низькі викиди навіть при зміні складу або концентрації пилу у вихідних газах.

Впровадження рукавних фільтрів на аглофабриці дозволяє значно знизити загальне пилове навантаження на атмосферне повітря, особливо у зоні впливу житлової забудови. Це сприяє зменшенню негативного впливу на здоров'я населення (ризиків респіраторних захворювань, алергічних реакцій тощо). Окрім пилу, рукавні фільтри уловлюють важкі метали у твердих частинках (Pb, Zn, Mn), що робить технологію екологічно безпечнішою порівняно з традиційними системами очищення. Уловлений пил може бути повернений у виробництво як вторинна сировина, що додатково зменшує обсяг відходів.

Застосування високоефективних рукавних фільтрів є одним із ключових рішень, рекомендованих у документах Найкращих доступних технологій (BAT) для металургійної галузі ЄС (BREF for Iron and Steel Production). BAT прямо вказують на необхідність використання фільтраційних систем із показниками очищення <10 мг/м³, причому рукавні фільтри часто демонструють результати 1–5 мг/м³. Технологія вважається пріоритетною для агломераційних фабрик з огляду на високу ефективність, економічну доцільність, відносно низькі експлуатаційні витрати та можливість інтеграції у діючі газоочисні комплекси.

3.2.2. Пропозиція 2: Встановлення систему уловлювання та очищення димових газів на основі електрофільтрів нового покоління

Електрофільтри (електростатичні precipitators, ESP) працюють завдяки електричному заряду, який надається частинкам пилу у газовому потоці. Заряджені частинки переміщуються до осаджувальних пластин із протилежним зарядом і осідають на них. Періодичне струшування пластин дозволяє зібраний пил скидати у нижній бункер. Установки нового покоління оснащені високовольтними живильними блоками з автоматичним регулюванням напруги, системами контролю опору пилу та адаптивної корекції коронного розряду. Це підвищує стабільність роботи навіть при зміні складу газів та температури.

Сучасні електрофільтри забезпечують рівень очищення до 20–30 мг/м³, а при використанні трипольної системи та покращеної конструкції корони — до 10 мг/м³. Хоч їх ефективність дещо нижча, ніж у рукавних фільтрів, ESP гарантують стабільну роботу при високотемпературних потоках (до 300–350 °С) і підвищених об'ємах газу. Оновлені системи керування дозволяють отримувати результат, максимально близький до вимог ВАТ.

Встановлення модернізованих електрофільтрів забезпечує значне зниження концентрації пилу у викидах аглофабрики, що сприяє покращенню якості повітря у зоні впливу підприємства. ESP ефективно знижують вміст твердих частинок, зокрема оксидів заліза та частинок, що містять важкі метали. Окрім цього, електрофільтри здатні працювати у високопилкових режимах, що важливо для агломераційного виробництва, де навантаження на газоочистку є нестабільним.

У документах ВАТ для металургійних підприємств (BREF Iron and Steel Production) підкреслюється, що високоефективні електрофільтри належать до рекомендованих методів очищення агломераційних і доменних газів, за умови забезпечення кінцевої концентрації <20 мг/м³. ESP нового покоління відповідають цим вимогам, а при використанні комбінованих систем (електрофільтр + рукавний фільтр) можуть досягати рівнів <10 мг/м³, що повністю відповідає найкращим доступним технологіям ЄС.

3.2.3. Пропозиція 3: Комплексна переробка металовмісних шламів (концентраційні технології)

Комплексна система переробки металовмісних шламів передбачає використання фільтр-пресів, згущувачів, гідроциклонів та систем сепарації для вилучення дрібнодисперсних металовмісних частинок. Після згущення та зневоднення шлами формуються у міцні брикети за допомогою прес-брикетувальних установок. Брикети з високим вмістом Fe та легуючих

елементів (Mn, Si, Ca) повертаються у доменне або агломераційне виробництво.

Застосування фільтр-пресів дозволяє зменшити вологість шламів до 15–20 %, що значно підвищує їх ефективність у подальшому брикетуванні. За рахунок концентраційних технологій вдається вилучати до 60–75 % заліза, створюючи вторинну сировину, придатну для металургійного циклу. Впровадження брикетування забезпечує високу механічну міцність продукту та стабільність його поведінки у печах.

Комплексна переробка шламів дозволяє зменшити обсяг відходів IV класу небезпеки, які зазвичай захоронюються у відвалах. Оскільки шлами містять важкі метали та солі, їх утилізація замість складування знижує ризики вторинного забруднення ґрунтів і підземних вод. Повернення металовмісних компонентів у виробництво також зменшує потребу у видобутку та транспортуванні первинної руди, знижуючи загальне антропогенне навантаження.

ВАТ для металургійного сектору рекомендують максимізацію внутрішньої утилізації металевих шламів з використанням механічної, магнітної та фільтраційної сепарації, а також брикетування. Пропонована технологія відповідає цим вимогам: вона дозволяє знизити обсяг захоронюваних відходів, скоротити втрати металу та підвищити ефективність матеріальних потоків. Такі підходи прямо визначені в європейських документах як одні з найбільш екологічно та економічно ефективних.

3.2.4. Пропозиція 4: Система цифрового моніторингу довкілля з використанням IoT та AI

Запропонована система передбачає розширення та модернізацію існуючої мережі моніторингу за рахунок впровадження IoT-станцій нового покоління, оснащених високочутливими сенсорами для вимірювання концентрацій пилу (PM_{2.5}, PM₁₀), SO₂, NO_x, CO, вуглеводнів та параметрів метеосупроводу (вітер,

температура, вологість). Дані передаються у реальному часі до центрального сервера, де обробляються модулями штучного інтелекту, що виконують фільтрацію шумів, аналіз трендів та прогнозування.

Розширення мережі вимірювальних пунктів. Додаткові IoT-станції можна розмістити:

- у житлових мікрорайонах, що потрапляють у зони потенційного впливу підприємства;
- на санітарно-захисній зоні;
- на межі проммайданчика;
- у напрямках переважаючих вітрів.

Це забезпечує створення деталізованої карти забруднення, що дозволяє оперативно реагувати на пікові викиди та локалізувати їх джерела.

Можливості прогнозування та аналітики завдяки алгоритмам AI які виконують:

- короткострокове прогнозування забруднення повітря (1–24 год);
- виявлення аномалій у роботі газоочисних установок;
- визначення кореляцій між метеофакторами та концентраціями забруднювачів;
- формування автоматизованих технічних звітів.

Такі можливості підсилюють систему екологічного менеджменту підприємства та дозволяють зменшити ризики порушення нормативів.

Публічний доступ до даних. Оновлена система забезпечує відкриту онлайн-платформу, де у режимі реального часу відображаються:

- дані усіх постів моніторингу;
- графіки концентрацій;

- індекс якості повітря (AQI);
- оперативні повідомлення про перевищення нормативів.

Це підвищує рівень екологічної прозорості та довіри до підприємства з боку громади.

Інтеграція з внутрішніми системами підприємства.

Система сумісна з автоматизованими комплексами технологічного контролю (АСУ ТП), що дозволяє:

- отримувати миттєві сигнали про зростання викидів;
- автоматично коригувати режими роботи пилогазоочисних агрегатів;
- оптимізувати енергозатрати та ресурси;
- формувати звітність для державних контролюючих органів.

Документи НДТМ для металургійного сектору наголошують на пріоритетності безперервного автоматичного моніторингу (CEMS), цифровізації систем контролю та використанні інтелектуальної аналітики для мінімізації впливів на довкілля. Запропонована система відповідає цим вимогам і дозволяє підприємству перейти до моделі проактивного екологічного менеджменту, що істотно підвищує відповідність європейським стандартам.

Таблиця 3

№	Технологічна пропозиція	Основний принцип дії	Очікуваний екологічний ефект	Економічний ефект / вигоди	Відповідність ВАТ
---	-------------------------	----------------------	------------------------------	----------------------------	-------------------

1	Модернізація газоочистки аглофабрики (рукавні фільтри)	Глибоке фільтрування газового потоку через багат шарові тканинні фільтри; автоматична регенерація	Зниження пилу до ≤ 5 мг/м ³ ; зменшення SO ₂ ; значне зниження внеску аглофабрики в забруднення Кривого Рогу	Зменшення штрафів; підвищення енергоефективності; продовження ресурсу устаткування	Висока (ВАТ №15, 18, 20)
2	Мембранні системи очищення оборотних вод (UF+NF)	Високоселективне пропускання води через мембрани, затримання завислих і розчинених речовин	Зниження мінералізації; очищення оборотних циклів; скорочення водозабору на 90–95%; мінімізація скидів у Інгулець	Економія води; зменшення плати за спецводокористування; менші витрати на реагенти	Висока (ВАТ №26–29)
3	Комплексна переробка металовмісних шламів (фільтр-преси + брикетування)	Зневоднення шламів, концентрування металів, формування брикетів для повернення у доменний цикл	Зменшення відходів IV класу небезпеки; зменшення пиління; скорочення площ шламонакопичувачів	Повернення металу у виробництво; зменшення витрат на утилізацію; вторинна сировина	Середньо-висока (ВАТ №31, 34)
4	Цифровий екологічний моніторинг (IoT + AI)	Безперервний автоматичний збір даних, аналіз і прогнозування забруднення, AI-оптимізація режимів газоочистки	Рання діагностика перевищень; повна прозорість даних; покращення екологічного менеджменту	Зменшення аварій; оптимізація витрат; зниження ризиків штрафів і збитків	Висока (ВАТ щодо CEMS, continuous monitoring)

Порівняльна таблиця технологічних пропозицій

Запропонований комплекс технологічних рішень охоплює ключові напрями екологічної модернізації ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та відповідає сучасним вимогам НДТМ (ВАТ) у металургійній галузі. Проведений порівняльний аналіз засвідчив, що кожна з чотирьох пропозицій має не лише значний екологічний ефект, але й забезпечує суттєві економічні вигоди за рахунок скорочення втрат сировини, зниження штрафних санкцій, підвищення ресурсоощадності та покращення технологічної ефективності виробництва.

Особливо важливо, що усі запропоновані заходи спрямовані на усунення саме тих проблем, які були виявлені у розділі 2: надмірні викиди пилю з аглофабрики, високий рівень водозабору та концентрація завислих речовин у стоках, накопичення металовмісних шламів та недостатня прозорість екологічного контролю. Впровадження високоефективних рукавних фільтрів, мембранних технологій очищення вод, комплексної переробки шламів та цифрового моніторингу створює передумови для переходу підприємства до моделі низьковуглецевого та циркулярного виробництва.

Таким чином, модернізація, представлена в підпункті 3.2, є не лише необхідною, але й стратегічно обґрунтованою, оскільки дозволяє підприємству досягти відповідності європейським екологічним нормам, знизити техногенний вплив на довкілля Криворізького регіону та підвищити конкурентоспроможність продукції на зовнішніх ринках.

3.3. Екологічна та економічна оцінка запропонованих заходів

3.3.1. Оцінка техніко-економічної ефективності

Оцінювання техніко-економічної ефективності запропонованих природоохоронних рішень для ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» ґрунтується на комплексному підході, що враховує як капітальні та операційні витрати, так і довгостроковий економічний ефект від зменшення негативного впливу на довкілля. Для промислових підприємств гірничо-

металургійного комплексу особливо важливою є оцінка скорочення ресурсоспоживання, зменшення фінансових втрат від екологічних штрафів та відповідності європейським екологічним стандартам, що суттєво впливатиме на конкурентоспроможність продукції на ринках ЄС у межах механізму СВМ.

Методичні підходи до техніко-економічної оцінки . Аналіз ефективності запропонованих заходів здійснюється за такими основними напрямками:

1. Оцінка капітальних витрат (CapEx)

Включає закупівлю обладнання, монтаж, модернізацію інфраструктури, навчання персоналу. Для екологічних систем у металургії характерна висока капіталомісткість, проте довгостроковий ефект переважає первинні інвестиції.

2. Оцінка операційних витрат (OpEx)

Враховуються витрати на експлуатацію, електроенергію, заміну фільтрів та мембран, реагенти, обслуговування та амортизацію.

3. Економія ресурсів

Оцінюються потенційні обсяги зниження споживання технічної води (до 90–95 % при застосуванні мембранних систем), зменшення втрат металовмісної сировини (за рахунок переробки шламів і пилу) та економія енергії у виробничих циклах.

4. Скорочення екологічного податку

Зменшення викидів забруднюючих речовин безпосередньо знижує податкове навантаження підприємства. Наприклад, зменшення пилу та SO₂ за рахунок нових фільтраційних систем призведе до пропорційного скорочення платежів.

5. Зменшення витрат на штрафи та компенсаційні заходи

Для підприємств із підвищеним екологічним навантаженням штрафи та збитки від екологічних претензій становлять значні витрати. Запровадження високоефективних систем очищення дозволяє істотно знизити ці ризики.

6. Зменшення витрат, пов'язаних із простоем виробництва через екологічні інциденти

На металургійних підприємствах екологічні аварії можуть призводити до тимчасового зупинення агрегатів, що створює додаткові економічні втрати. Цифрові системи моніторингу дають змогу мінімізувати такі ризики.

Оцінка ефективності запропонованих заходів

1. Модернізація систем газоочистки аглофабрики (рукавні фільтри)

Технічний ефект:	Економічний ефект:	Загальна оцінка:
<p>Забезпечення рівня пилу $\leq 5-10$ мг/м³ (рівень ВАТ);</p> <p>Стабільна робота при змінних навантаженнях;</p> <p>Довготривалий ресурс фільтрувальних рукавів.</p>	<p>Суттєве скорочення екоподатку за викиди пилу та важких металів;</p> <p>Зменшення ризику штрафних санкцій за перевищення ГДК;</p> <p>Підвищення енергоефективності аспіраційних систем.</p>	<p>Висока капіталомісткість компенсується значними довгостроковими екологічними та фінансовими вигодами</p>

2. Впровадження мембранних систем очищення оборотних вод

Технічний ефект:	Економічний ефект:	Загальна оцінка:
<p>Зниження мінералізації та завислих речовин до рівня, що відповідає сучасним водоохоронним вимогам;</p> <p>Скорочення водозабору на 90–95 %;</p> <p>Можливість майже повного переходу до замкненого циклу водопостачання.</p>	<p>Економія коштів на заборі води та її підготовці;</p> <p>Зменшення платежів за скиди;</p> <p>Скорочення витрат на реагенти та осадоутворення.</p>	<p>Одна з найбільш економічно ефективних пропозицій у довгостроковій перспективі</p>

3. Комплексна переробка металовмісних шламів і пилу

Технічний ефект:	Економічний ефект:	Загальна оцінка:
<p>Вилучення до 60–70 % металу з шламів;</p> <p>Зниження обсягу відходів IV класу</p>	<p>Суттєве зменшення витрат на захоронення;</p> <p>Додатковий ресурсний ефект (заміна частини руди або концентрату металом зі</p>	<p>Висока окупність завдяки відчутній ресурсній економії.</p>

небезпеки;	шламів);	
Повернення металовмісної сировини у виробництво.	Зниження екологічного податку за відходи.	

4. Система цифрового моніторингу з використанням ІоТ та АІ

Технічний ефект:	Економічний ефект:	Загальна оцінка:
Точний контроль параметрів викидів;	Скорочення витрат на лабораторний контроль;	Висока ефективність при помірній вартості впровадження.
Можливість попередження аварійних перевантажень;	Зниження ризику аварійних ситуацій;	
Автоматизоване прогнозування забруднення повітря.	Підвищення прозорості та довіри з боку місцевої громади та регуляторів.	

Впровадження запропонованих природоохоронних заходів забезпечує суттєве підвищення економічної та технічної ефективності виробництва. Найбільш капіталомісткими є модернізація систем газоочистки та мембранні установки, проте саме вони формують найбільший екологічний і фінансовий ефект у перспективі 5–10 років. Переробка металовмісних шламів та цифровий екологічний моніторинг характеризуються високим співвідношенням «витрати–ефект» і є доцільними для поетапного впровадження. Сукупний результат модернізації — зниження ресурсоспоживання, скорочення екологічних ризиків і підвищення відповідності вимогам ЄС.

3.3.2. Оцінка екологічної ефективності запропонованих заходів

Екологічна ефективність запропонованих технологічних рішень визначається ступенем зменшення негативного впливу діяльності ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» на атмосферне повітря, водні ресурси та стан відходоутворення. Важливість такого аналізу зумовлена тим, що металургійне виробництво належить до найбільш екологічно навантажених галузей, а ступінь реалізації природоохоронних заходів визначає рівень екологічної безпеки регіону та

відповідність підприємства європейським вимогам. Екологічна ефективність оцінюється за ключовими індикаторами, які відповідають методичним підходам систем екологічного менеджменту ISO 14001, концепції BAT (Best Available Techniques) та вимогам Директиви ЄС 2010/75/ЄС.

Зменшення викидів пилу. Впровадження високоефективних рукавних фільтрів на аглофабриці та модернізація аспіраційних систем забезпечує:

- Зниження концентрації пилу у викидах до рівня 5–10 мг/м³, що відповідає показникам BAT;
- Скорочення загальної маси пилових викидів на 40–70 % залежно від виробничої ділянки;
- Зменшення навантаження на житлові райони Кривого Рогу, зокрема на Покровський та Металургійний райони, де традиційно фіксується підвищена пилова концентрація.

Очікуваним результатом є зниження рівня захворюваності населення на респіраторні хвороби та покращення показників якості атмосферного повітря.

Зниження концентрацій SO₂, NO_x, CO. Модернізація газоочисних систем та стабілізація доменного і конвертерного технологічних процесів сприяє:

- Скороченню викидів SO₂ на 20–35 % за рахунок використання систем десульфурації та оптимізації складу шихти;
- Зниженню NO_x на 10–25 % завдяки контролю температурних режимів горіння та застосуванню більш ефективних горілочних пристроїв;
- Зменшенню викидів CO на 15–30 %, що також відповідає вимогам BAT.

Такі результати не лише знижують токсикологічний вплив на населення, але й зменшують вклад підприємства у формування смогу та кислотних опадів.

Зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти. Впровадження мембранних систем очищення води та розширення замкнених водооборотних циклів забезпечує:

- Зниження концентрації завислих речовин, нафтопродуктів та солевмісту у стічних водах у 3–10 разів;
- Скорочення обсягів скидів у річку Інгулець і Карачунівське водосховище до технологічно мінімально можливого рівня;
- Зменшення водозабору з природних джерел на 80–95 % (залежно від масштабу впровадження).

Це сприяє зменшенню деградації водних екосистем, ризику вторинного забруднення та покращенню якості води у зоні впливу підприємства.

Зменшення обсягів утворення небезпечних відходів. Комплексна переробка металовмісних шламів, пилу та шлаків дозволяє:

- Зменшити утворення відходів IV класу небезпеки на 30–60 %;
- Повернути у виробництво до 60 % металовмісних компонентів, що знижує ресурсну залежність;
- Зменшити площі відвалів та шламонакопичувачів, що знижує ризики забруднення ґрунтів і підземних вод.

Крім того, зменшується небезпека аварій на хвостосховищах та відвалах, що є важливим фактором техногенної безпеки регіону.

Запропоновані природоохоронні заходи формують виражений екологічний ефект у всіх ключових сферах — атмосферному повітрі, водних ресурсах та утворенні відходів. Найбільш значним результатом є зниження пилових викидів та перехід до високого рівня очищення води, що дозволяє досягти стандартів ВАТ та європейських нормативів. Реалізація цих заходів сприятиме зменшенню екологічного навантаження на м. Кривий Ріг,

покращенню стану довкілля та підвищенню екологічної безпеки промислових територій. Сукупний екологічний ефект створює підґрунтя для переходу підприємства до принципів циркулярної економіки та сталого розвитку.

3.3.3. Прогноз довгострокових результатів впровадження запропонованих природоохоронних заходів

Довгостроковий прогноз екологічних та соціально-економічних ефектів визначається на основі тенденцій, властивих модернізації металургійних підприємств, а також відповідних міжнародних стандартів і наукових підходів до оцінки сталого розвитку промисловості. Комплексний характер запропонованих заходів (модернізація газоочистки, перехід до замкнених водооборотних систем, переробка металовмісних відходів, цифровий моніторинг) дає змогу очікувати значні позитивні зміни у всіх ключових сферах екологічного менеджменту.

1. Поліпшення якості атмосферного повітря в Кривому Розі

Системна модернізація газоочисного устаткування та зниження пилових, газових і органічних викидів формує умови для поступового зниження середньорічних концентрацій пилю, SO₂, NO_x, CO у повітрі промислових районів міста, скорочення кількості днів із перевищенням гранично допустимих концентрацій (ГДК), зменшення масштабів формування промислового смогу та покращення показників інтегрального індексу якості повітря (AQI). У довгостроковій перспективі (5–10 років) це сприятиме покращенню стану здоров'я населення, зниженню рівня респіраторних та серцево-судинних захворювань, а також зменшенню витрат міста на медичні та компенсаційні програми, пов'язані із забрудненням повітря.

2. Зменшення соціально-екологічної напруги

Покращення екологічної ситуації неминуче впливає на соціальний фон регіону, а саме скоротяться підстави для екологічних протестів і конфліктів

між громадськістю та промисловим сектором, підвищиться рівень довіри населення до природоохоронної політики підприємства, зменшиться кількість скарг на промислові викиди, запахи, пилові бурі та інші негативні явища та зросте імідж регіону як території безпечного проживання та інвестиційної привабливості. Відкритість екологічних даних (цифрові системи моніторингу, доступ у режимі онлайн) підсилює відчуття прозорості та відповідальності підприємства перед громадою.

3. Підвищення відповідності стандартам ЄС та вимогам СВМ

У світлі євроінтеграційних процесів України та впровадження Carbon Border Adjustment Mechanism (СВМ), модернізація екологічної інфраструктури ArcelorMittal Кривий Ріг має стратегічне значення. Очікувані результати:

- наближення підприємства до вимог Директиви ЄС 2010/75/ЄС (IED) та довідників VAT/BREF;
- зниження вуглецевого та екологічного сліду продукції;
- підвищення конкурентоспроможності української металургії на європейському ринку;
- зменшення витрат на сертифікацію та транскордонні екологічні платежі (СВМ);
- формування потенціалу для експортноорієнтованого розвитку підприємства.

Таким чином, модернізація природоохоронних систем має безпосередній вплив на економічну стійкість підприємства у контексті нової європейської регуляторної політики.

4. Перехід підприємства до циркулярної моделі управління ресурсами

Впровадження мембранних технологій очищення води, утилізація металовмісних шлаків, переробка шлаків та цифрові системи моніторингу створюють передумови для трансформації підприємства з лінійної на

циркулярну модель. Очікувані довгострокові результати: значне збільшення частки вторинної сировини у виробничому циклі, формування замкнених циклів води та матеріалів, зниження обсягів відходів, що потребують складування, оптимізація споживання енергії та ресурсів та підвищення інтегральної екологічної ефективності виробництва. Це забезпечить перехід від принципу «take–make–dispose» до моделі «reduce–reuse–recycle–recover», що є основою концепції сталого розвитку і ключовою вимогою ЄС до важкої промисловості.

У довгостроковій перспективі впровадження запропонованих природоохоронних заходів сприятиме суттєвому покращенню екологічного стану м. Кривий Ріг, підвищенню соціальної стабільності та досягненню стратегічних цілей підприємства у сфері європейської інтеграції. Формування циркулярної моделі промислового виробництва забезпечить зниження ресурсної інтенсивності, скорочення забруднення та зміцнення позицій підприємства на глобальному ринку металургійної продукції.

У розділі 3 було здійснено комплексне обґрунтування необхідності модернізації природоохоронних технологій ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та розроблено низку технічно й екологічно доцільних рішень, спрямованих на суттєве зменшення негативного впливу підприємства на довкілля. Проведений аналіз показав, що, попри наявність діючих систем газоочистки, водопідготовки та управління відходами, їхня ефективність залишається недостатньою для забезпечення відповідності сучасним міжнародним стандартам і вимогам найкращих доступних технологій (BAT). В окремих сегментах виробництва виявлено перевищення нормативів по пилу, діоксиду сірки, оксидах азоту, а також наявність ризиків забруднення водних ресурсів та утворення значних обсягів металовмісних відходів.

Запропоновані у підрозділі 3.2 технологічні рішення – модернізація газоочистки аглофабрики за рахунок рукавних фільтрів, впровадження мембранних систем очищення оборотних вод, комплексна переробка шламів

та створення цифрової системи екологічного моніторингу – демонструють високу екологічну доцільність та відповідність принципам сталого розвитку. Їх реалізація дає змогу суттєво зменшити викиди пилу й газоподібних речовин, скоротити обсяги техногенних скидів у водні об'єкти, мінімізувати утворення небезпечних відходів та підвищити точність і прозорість екологічного контролю.

Результати оцінки екологічної та техніко-економічної ефективності (підрозділ 3.3) засвідчують, що модернізація природоохоронної інфраструктури підприємства має як екологічні, так і економічні переваги. Зменшення екологічного податку, скорочення штрафних санкцій, підвищення ефективності ресурсокористування та потенційне покращення конкурентоспроможності на ринку ЄС (з урахуванням дії механізму СВМ) формують стійкі економічні стимули для реалізації запропонованих заходів. У довгостроковій перспективі вони сприятимуть поліпшенню якості повітря та води у місті Кривий Ріг, зменшенню соціально-екологічної напруги, а також підвищенню відповідності підприємства європейським екологічним нормативам.

Отже, реалізація запропонованих технологій модернізації є ключовою передумовою переходу підприємства до циркулярної моделі управління ресурсами та забезпечення сталого промислового розвитку регіону. Розділ 3 підтвердив, що технічні інновації, поєднані з екологічною відповідальністю, здатні забезпечити суттєве скорочення техногенного навантаження та створити основу для екологічно безпечного функціонування металургійного комплексу в умовах сучасних викликів.

ВИСНОВОК

У ході виконання дипломної роботи було проведено комплексне дослідження сучасних технологій захисту навколишнього середовища в промисловості, їх нормативно-правового забезпечення та можливостей практичного

застосування на прикладі великого металургійного підприємства. Робота має системний характер і охоплює теоретичні, аналітичні та прикладні аспекти екологічної модернізації промислового виробництва.

Перший розділ містить теоретичне обґрунтування екологічних проблем, спричинених розвитком промисловості, та показав, що традиційна лінійна модель виробництва більше не відповідає сучасним викликам. Було встановлено, що основними чинниками негативного впливу промисловості є забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів і ґрунтів, а також утворення великих обсягів промислових відходів і високий рівень енергоспоживання. Аналіз міжнародних та національних нормативних документів продемонстрував, що екологічна політика України знаходиться у фазі активної адаптації до вимог Європейського Союзу, зокрема до положень Директиви 2010/75/ЄС, принципів найкращих доступних технологій (BAT) та концепції циркулярної економіки. Це формує основу для екологічної модернізації промисловості та зміни підходів до управління техногенним навантаженням.

Другий розділ присвячено аналізу екологічного стану та технічних рішень конкретного промислового підприємства. Було ідентифіковано основні джерела викидів у повітря, встановлено їх домінуючий вплив на якість атмосферного середовища Криворіжжя та визначено ключові забруднювачі, характерні для агломераційних, доменних, конвертерних і коксохімічних процесів. Аналіз водокористування показав, що, попри наявність систем водообороту, залишається значний потенціал для зменшення скидів стічних вод та зниження солевого навантаження на водні об'єкти. У сфері поводження з відходами встановлено, що підприємство генерує значні обсяги шлаків, шламів і пилу, частина з яких потребує більш глибокої переробки та повторного залучення в технологічний цикл. Узагальнення екологічних ризиків показало, що їхній вплив охоплює не лише природні компоненти, а й

соціальну сферу — здоров'я населення, рівень екологічної напруги та загальну якість життя в регіоні.

У третьому розділі було запропоновано комплекс заходів із модернізації природоохоронних технологій відповідно до сучасних міжнародних вимог. Серед них — впровадження високоефективних рукавних фільтрів на аглофабриці, застосування мембранних технологій для очищення оборотних вод, створення системи комплексної переробки металовмісних шламів та запровадження цифрового екологічного моніторингу на основі IoT та систем штучного інтелекту. Проведена еколого-економічна оцінка продемонструвала, що реалізація запропонованих заходів забезпечує значний позитивний ефект: суттєве скорочення викидів пилу та газів, зменшення скидів у водні об'єкти, скорочення утворення небезпечних відходів, зниження витрат на екологічні платежі та штрафи. Додатково було показано, що модернізація створює довгострокові економічні переваги, включно з підвищенням конкурентоспроможності продукції у контексті вимог СВАМ та інтеграції на європейські ринки.

Узагальнюючи результати дослідження, слід відзначити, що впровадження сучасних екологічних технологій є не лише необхідною умовою зменшення техногенного навантаження, але й стратегічним напрямом розвитку промислових підприємств в умовах глобальних екологічних і ринкових змін. Модернізація природоохоронних систем відповідно до ВАТ, цифровізація моніторингу, розвиток циркулярної економіки та оптимізація ресурсокористування забезпечують формування нової, більш екологічно відповідальної та конкурентоспроможної моделі промисловості.

Таким чином, результати дипломної роботи підтверджують, що екологічна модернізація промислових підприємств є ключовою умовою сталого розвитку, інтеграції України у європейський екологічний простір і формування безпечного та здорового середовища для суспільства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яковлев Є. О. Екологічна безпека промислового виробництва. Київ: Ліра-К, 2020. 256 с.
2. Європейська Комісія. Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Brussels, 2020.

3. Державна служба статистики України. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами. Статистичний збірник. Київ, 2023.
4. WHO. Air Quality Guidelines. Global Update 2021. Copenhagen: World Health Organization, 2021.
5. Хільчевський В. К., Забокрицька М. Р. Екологічні проблеми водних ресурсів України. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2018. 312 с.
6. Державне агентство водних ресурсів України. Національна доповідь про стан водних ресурсів України за 2023 рік. Київ, 2024.
7. Буркинський Б. В., Харічков С. К. Екологічні аспекти функціонування промислових регіонів України. Одеса: ІПРЕЕД НАН України, 2020.
8. Міндовкілля. Національна стратегія управління промисловими та небезпечними відходами до 2050 року. Київ, 2021.
9. Могильний О. М. Техногенні відходи: екологічні ризики та шляхи їх зменшення. Харків: ХНУМГ, 2021.
10. IEA. Energy Efficiency Indicators 2022. Paris: International Energy Agency, 2022.
11. European Environment Agency. Greenhouse Gas Emissions by Sector. EEA Report, 2023.
12. Шмандій В. М. Техногенні аварії та їх екологічні наслідки. Дніпро: НМетАУ, 2019.
13. European Environment Agency. Circular economy in Europe: Developing the knowledge base. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.
14. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. — Cowes, UK, 2013.

15. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні за 2023 рік. — Київ, 2024.
16. Державна служба статистики України. Викиди забруднюючих речовин у атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення за 2020–2023 роки. — Київ, 2024.
17. Закон України «Про управління відходами» № 2320-IX від 20.06.2022.
18. European Commission. Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Brussels, 2020.
19. Chertow M. Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*. 2000. №25. С. 313–337.
20. European Institute of Innovation and Technology. Industrial Symbiosis Report 2021. Brussels, 2021.
21. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. План заходів з реалізації Національної стратегії управління відходами до 2030 року. Київ, 2023.
22. European Green Deal. European Commission Report 2021.
23. Lombardi D., Laybourn P. Redefining Industrial Symbiosis: Crossing Academic–Practical Boundaries. *Journal of Industrial Ecology*. 2012. №16(1). С. 28–37.
24. Jacobsen N. W. Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment. *Journal of Industrial Ecology*. 2006. №10(1–2). С. 239–255.
25. European Parliament. REACH Regulation (EC) No 1907/2006 on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals. *Official Journal of the EU*, 2006.

26. ISO. ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
27. UNEP. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. United Nations Environment Programme, 2001
28. UNECE. Convention on the Transboundary Effects of Industrial Accidents. United Nations Economic Commission for Europe, 1992.
29. European Parliament. Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). Official Journal of the EU, 2010.
30. Закон України «Про запобігання, зменшення та контроль промислового забруднення» від 01.12.2022 р. № 2722-IX.
31. European IPPC Bureau. Best Available Techniques Reference Documents (BREFs). Joint Research Centre, European Commission.
32. European Commission. European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR). Brussels, 2020.
33. Журавель В.В. Економічний механізм природокористування: теоретичні засади та перспективи розвитку. *Економіка та держава*. 2020. № 6.
34. Податковий кодекс України від 02.12.2010 № 2755-VI (зі змінами).
35. European Commission. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) — Regulation (EU) 2023/956.
36. Водний кодекс України від 06.06.1995 № 213/95-ВР; Кодекс України про надра від 27.07.1994 № 132/94-ВР; Лісовий кодекс України від 21.01.1994 № 3852-XII.
37. Міндовкілля України. Щорічна доповідь про стан довкілля в Україні за 2022 рік.
38. European Bank for Reconstruction and Development. Green Economy Financing Facility (GEFF) Programme Report. London, 2021.
39. Закон України «Про страхування» від 07.03.1996 № 85/96-ВР.

40. Directive 2004/35/EC of the European Parliament and of the Council on environmental liability.
41. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України № 1264-ХІІ від 25.06.1991.
42. Національний стандарт України. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 14001:2015, IDT): ДСТУ ISO 14001:2015.
43. Про управління відходами: Закон України № 2320-ІХ від 20.06.2022.
44. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Implementation of EU Industrial Emissions Directive: National Report. Київ, 2023.
45. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau. Best Available Techniques (BAT) Reference Documents (BREF). Luxembourg: Publications Office of the EU, 2019.
46. Наказ Міністерства економіки України щодо гармонізації стандартів у сфері екологічного менеджменту № 148-2021.
47. Яремко З. М., Синяк В. П. Екологічні аспекти галузевого регулювання промисловості України // Екологічна безпека та природокористування. 2020. № 4.
48. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» №1264-ХІІ від 25.06.1991.
49. Закон України «Про охорону атмосферного повітря». №2707-ХІІ від 16.10.1992.
50. Водний кодекс України.
51. Закон України «Про управління відходами». №2320-ІХ від 20.06.2022.
52. Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку».
53. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля».
54. Кодекс України про надра.

55. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення».
56. Закон України «Про державний екологічний контроль».
57. Міністерство довкілля. Довідники НДТМ (BREF) для української промисловості.
58. Постанова КМУ «Про затвердження Порядку ведення реєстру викидів і перенесення забруднювачів».
59. Наказ Міндовкілля «Про затвердження методики визначення обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря».
60. Державні санітарні норми та правила щодо ГДК забруднювачів.
61. Угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом: Офіційний вісник України. 2014.
62. Бобко А. М. Економіко-правові інструменти забезпечення екологічної безпеки в Україні // Право України. 2021. №4.
63. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Електронні реєстри та цифровізація екологічної політики: офіційний портал.
64. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques. European Commission, 2019.
65. Drozdova O. V., Velychko O. M. Екологічні технології та обладнання. Київ: НТУУ «КПІ», 2020.
66. Чорний І. М. Технології захисту навколишнього середовища. Львів: Вид-во ЛНУ, 2018.
67. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Звіт про стан навколишнього природного середовища, 2023.
68. BAT Reference Document for the Management of Waste. European Commission, 2018.

69. Best Available Techniques (BAT) Guidelines for Ukraine. Міндовкілля, 2021.
70. OECD. Environmental Performance Review. 2021.
71. UNEP. Global Environment Outlook. — Nairobi, 2021.
72. United Nations. Environmentally Sound Technologies: Concepts and Applications.
73. Праховнік А. П., Шмандій В. М. Екологічні основи техногенної безпеки. - Київ: КНУТД, 2020.
74. United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development.
75. UNIDO. Cleaner Production Guidelines. — Vienna, 2019.
76. Жукова М. В. Методологічні засади чистого виробництва. // Екологія та ресурси. — 2020.
77. UNIDO. Resource Efficient and Cleaner Production Programme Annual Report, 2022.
78. WHO. Air Quality and Health. — Geneva, 2021.
79. European Environment Agency. Industrial emissions in Europe. — Copenhagen, 2022.
80. Шмандій В. М., Білявський Г. О. Основи промислової екології. — Київ: Ліра-К, 2019.
81. European Commission. BREF for Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries.
82. Rau J. Air Pollution Control Engineering. — CRC Press, 2019.
83. European Commission. Best Available Techniques Reference Documents (BREF).
84. Pandey G. Pollution Control Technologies. — Springer, 2020.
85. Левченко В. В. Екотехнології у промисловості. — Харків: НТУ «ХП», 2020.

86. EPA. VOC Control Technologies. — Washington, 2020.
87. Singh A., Ward O. Biotechnologies for Air Pollution Control. — Elsevier, 2018.
88. Богданов, А. І. Очищення стічних вод: підручник. Київ: Ліра-К, 2018. 320 с.
89. Гутник, В. М. Біологічні методи очищення стічних вод: сучасні підходи та технології. Харків: ХНУБА, 2020. 256 с.
90. Колісник, О. С. Фізико-хімічні процеси у технологіях водоочищення. Львів: Новий Світ, 2021. 288 с.
91. Зацерковний, В. І. Мембранні технології у водоочищенні. Київ: Наукова думка, 2019. 210 с.
92. Плугатар, А. В. Методи дезінфекції очищених стічних вод: наукові основи та практика. Одеса: Екологія, 2020. 180 с.
93. Сердюк, І. О. Сучасні технології поводження з осадами стічних вод. Дніпро: ДВНЗ ПДАБА, 2022. 190
94. Білецький, В. С. Екологічні засади управління відходами в промисловості: монографія. Дніпро: НГУ, 2020. 312 с.
95. Гончарук, В. В. Технології поводження з твердими промисловими відходами: навч. посіб. Київ: КНУБА, 2019. 224 с.
96. Бойко, А. В. Термохімічні технології переробки відходів: монографія. Харків: ХПІ, 2021. 280 с.
97. Шевченко, О. М. Біотехнологічні процеси переробки органічних відходів. Одеса: Екологія, 2020. 198 с.
98. Кравець, С. М. Металургійні технології утилізації промислових відходів. Львів: Видавництво ЛНТУ, 2018. 244 с.

99. Губені, Ю. Е. Утилізація золошлакових матеріалів у будівництві. Київ: Будівельник, 2017. 156 с.
100. Мороз, Г. О. Плазмова деструкція небезпечних відходів: сучасні підходи та перспективи. Київ: НАН України, 2022. 172 с.
101. Мельник, Л. Г. Енергетичний менеджмент промислових підприємств: навч. Посіб. Суми: СумДУ, 2021. 348 с.
102. Горбань, І. І. Енергоефективні технології в промисловості: монографія. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2020. 276 с.
103. Сидоренко, В. М. Когенераційні установки для промисловості. Харків: ХНУМГ, 2019. 214 с.
104. Кузьменко, В. В. Цифрові технології в енергоменеджменті підприємств. Львів: ЛНТУ, 2022. 190 с.
105. Сисоєв, В. П. Енергоефективні електроприводи: навч. Посіб. Дніпро: НМетАУ, 2020. 232 с.
106. Тимербаєв, Р. Р. Ресурсозберігаючі технології у промисловості. Київ: Освіта України, 2018. 240 с.
107. Шевченко, О. М. Відновлювана енергетика в промисловості: сучасний стан і перспективи. Одеса: Екологія, 2020. 164 с.
108. Держенергоефективності. Щорічна доповідь про стан енергоефективності в Україні. Київ, 2022. 112 с.
109. Кравець, В.М. Системи екологічного моніторингу: теорія та практика. — Київ: Наукова думка, 2020.
110. Жуков, С.А. Екологічний менеджмент і аудит: сучасні підходи та цифрові рішення. — Харків: ХНАМГ, 2019.
111. Литвиненко, І.М. Геоінформаційні системи в екології: методологія та застосування. — Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2021.

112. Паламарчук, О.П. Інтернет речей у системах промислового моніторингу. — Дніпро: НМетАУ, 2022.
113. Демченко, О.О. Big Data та штучний інтелект в екологічній аналітиці. — Суми: СумДУ, 2023.
114. Романченко, Т.В. Використання безпілотних літальних апаратів у моніторингу довкілля. — Одеса: ОНУ ім. Мечникова, 2020.
115. Сисоєва, С.І. Інтегровані підходи до екологічної модернізації промисловості. — Київ: НаУКМА, 2021.
116. Гомеля, М.П. Технології очищення промислових стоків: сучасні тенденції та інноваційні рішення. — Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2020.
117. Дяченко, В.М. Управління промисловими відходами: теорія, практика та європейські стандарти. — Харків: ХНЕУ ім. Кузнеця, 2022.
118. Степаненко, Т.В. Індустріальний симбіоз як інструмент циркулярної економіки. — Дніпро: ДНУ ім. Гончара, 2023.
119. ArcelorMittal Official Website. — 2024.
120. ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Річний звіт. — Кривий Ріг: АМКР, 2021.
121. Державна служба статистики України. Промисловість України у 2020–2023 роках. — Київ: ДССУ, 2024.
122. Екологічний паспорт ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». — Кривий Ріг: АМКР, 2023.
123. Річний звіт ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» за 2021 р. — Кривий Ріг: АМКР, 2022.
124. Технічний опис виробничих процесів АМКР. — Кривий Ріг: АМКР, 2020.
125. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. BAT/BREF Implementation Report. — Київ, 2022.