

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ АГРОТЕХНОЛОГІЙ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ
КАФЕДРА ЕКОЛОГІЇ ТА ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ**

Допускається до захисту
«_____» _____ 2025 р.

Зав. кафедри _____
(підпис)

к.б.н., доцент Петро ХІРІВСЬКИЙ
наук. ступ., вч. зв.(ім'я та прізвище)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Магістр

(рівень вищої освіти)

**на тему: «Екологічна оцінка впливу металообробного підприємства на
стан довкілля та розробка пропозицій щодо впровадження екологічно
чистих технологій»**

Виконала: студентка групи Еко-71з

спеціальності 101 «Екологія»

Чернова Марта Михайлівна

Львів 2025

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет природокористування
Факультет агротехнологій та екології
Кафедра екології
Рівень вищої освіти «Магістр»
Галузь знань 10 «Природничі науки»
Спеціальність 101 «Екологія»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри _____
к.б.н., доцент Петро ХІРІВСЬКИЙ
«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студентки
Чернової Марти Михайлівни

1. Тема роботи: «Екологічна оцінка впливу металообробного підприємства на стан довкілля та розробка пропозицій щодо впровадження екологічно чистих технологій»

Затверджена наказом по університету №____ / к-с від _____

2. Термін подання студентом кваліфікаційної роботи 05 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані для кваліфікаційної роботи

Літературні джерела, нормативні документи, методики виконання досліджень, законодавча база України.

4. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань, які необхідно розробити)

Вступ

- 1 Огляд літератури

1.1 Сучасний стан, тенденції розвитку та екологізація металообробної промисловості в контексті євроінтеграції

1.2 Методологія оцінки життєвого циклу в металургії

1.3 Особливості впливу металургійних і металообробних підприємств на довкілля

2 Об'єкт, умови та методика досліджень

2.1 Загальна виробнича характеристика підприємства

2.2 Фізико-географічна характеристика району розташування підприємства

2.3 Основні види технологічних процесів у металообробці та їх екологічні аспекти

2.4 Обґрунтування методологічного підходу до екологічної оцінки техногенного навантаження металообробного виробництва

3 Результати дослідження

3.1 Технологічна детермінація та оцінка емісійного впливу на стан атмосферного повітря

3.1.1 Технологічні детермінанти утворення емісій

3.1.2 Оцінка впливу на якість повітряного басейну

- 3.2 Дослідження гідроекологічного стану та ефективності систем водовідведення
 3.3 Морфологічний аналіз та стратегія управління виробничими відходами
 3.4 Аналіз стратегічних екологічних ризиків та адаптаційного потенціалу
ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» в умовах воєнного стану
 3.5 Інтегральна оцінка стану атмосферного повітря в урбанізованій
агломерації Запоріжжя в контексті впливу діяльності ТОВ «ЗЛМЗ»
 3.6 Обґрунтування комплексної системи мітигації техногенного впливу
ТОВ «ЗЛМЗ» на шляху до кліматичної нейтральності
 4 Охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій
 4.1 Охорона праці та управління професійними ризиками на
металообробному підприємстві
 4.2 Комплексний підхід до захисту працівників і виробничих об'єктів
 4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

Висновки

Бібліографічний список

5. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3	Бальковський В.В., доцент кафедри екології			
4	Гордійчук Л.М., доцент кафедри інженерної механіки			

6. Дата видачі завдання 21 листопада 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів проєкту	При-мітка
1	Написання вступу та розділу «Огляд літератури»	22.09.24 р.– 31.12.24 р.	
2	Написання розділу «Об'єкт, умови та методика дослідження»	01.01.25 р.– 01.03.25 р.	
3	Написання розділу «Результати досліджень»	02.03.25 р.– 30.09.25 р.	
4	Написання розділу «Охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій», формулювання висновків, оформлення списку використаних літературних джерел	01.10.25 р.– 30.11.25 р.	

Студентка _____ Марта ЧЕРНОВА
 (підпис)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Володимир БАЛЬКОВСЬКИЙ
 (підпис)

УДК 504.05:621.7/.9:504.06

Екологічна оцінка впливу металообробного підприємства на стан довкілля та розробка пропозицій щодо впровадження екологічно чистих технологій. Чернова Марта Михайлівна. Кваліфікаційна робота. Кафедра екології та захисту довкілля. Львів, ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького, 2025. 67 с.

67 ст. текст. част., 12 табл., 14 рис., 46 джерел

У роботі здійснено комплексну екологічну оцінку впливу діяльності металообробного підприємства на стан навколишнього природного середовища в умовах воєнного стану та кліматичної нестабільності, що дозволило обґрунтувати заходи з модернізації виробництва відповідно до європейських стандартів екологічної безпеки та декарбонізації.

У роботі проаналізовано сучасний стан металообробного сектору України, досліджено виробничо-технологічні процеси підприємства та визначено основні джерела негативного впливу на атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти й утворення відходів. Здійснено оцінювання характеру та масштабів екологічного впливу діяльності підприємства, визначено рівні забруднення компонентів довкілля у зоні його впливу та ідентифіковано ключові екологічні ризики.

На основі результатів дослідження оцінено ефективність діючої системи екологічного управління й природоохоронних заходів та обґрунтовано комплекс пропозицій щодо впровадження екологічно чистих, енергоефективних і низьковуглецевих технологій, спрямованих на зниження негативного впливу на довкілля та підвищення екологічної стійкості виробництва.

Проаналізовано питання охорони праці та захист населення.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	9
1.1 Сучасний стан, тенденції розвитку та екологізація металообробної промисловості в контексті євроінтеграції	9
1.2 Методологія оцінки життєвого циклу в металургії	13
1.3 Особливості впливу металургійних і металообробних підприємств на довкілля	15
2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	21
2.1 Загальна виробнича характеристика підприємства	21
2.2 Фізико-географічна характеристика району розташування підприємства	22
2.3 Основні види технологічних процесів у металообробці та їх екологічні аспекти	25
2.4 Обґрунтування методологічного підходу до екологічної оцінки техногенного навантаження металообробного виробництва	27
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
3.1 Технологічна детермінація та оцінка емісійного впливу на стан атмосферного повітря	29
3.1.1 Технологічні детермінанти утворення емісій	30
3.1.2 Оцінка впливу на якість повітряного басейну	33
3.2 Дослідження гідроекологічного стану та ефективності систем водовідведення	39
3.3 Морфологічний аналіз та стратегія управління виробничими відходами	43
3.4 Аналіз стратегічних екологічних ризиків та адаптаційного потенціалу ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» в умовах воєнного стану	46

3.5	Інтегральна оцінка стану атмосферного повітря в урбанізованій агломерації Запоріжжя в контексті впливу діяльності ТОВ «ЗЛМЗ»	50
3.6	Обґрунтування комплексної системи мітигації техногенного впливу ТОВ «ЗЛМЗ» на шляху до кліматичної нейтральності ..	52
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ	57
4.1	Охорона праці та управління професійними ризиками на металообробному підприємстві	57
4.2	Комплексний підхід до захисту працівників і виробничих об'єктів	58
4.3	Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій	59
	ВИСНОВКИ.....	62
	БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	64

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується фундаментальним зсувом парадигми промислового виробництва у напрямі сталого розвитку, декарбонізації та ресурсно-ефективного виробництва. У цих умовах держави з традиційно потужним металургійним і металомістким виробництвом опиняються перед необхідністю глибокої екологічної модернізації. Для України, промисловий потенціал якої історично базується на металургії та розвиненому металообробному секторі, перехід до нових екологічних стандартів є не лише вимогою часу, але й стратегічною передумовою збереження конкурентоспроможності на світових ринках.

Металообробна галузь, що забезпечує широкий спектр наукоємної продукції – від машинобудівних компонентів до високоточних деталей для оборонної, транспортної та енергетичної сфер – відіграє системоутворюючу роль у національній економіці. Вона формує значну частку експорту з високою доданою вартістю, створює робочі місця та забезпечує критично важливі технологічні ланцюги. Саме тому її екологічна стійкість та здатність інтегрувати сучасні стандарти природоохоронної діяльності визначають глобальну інвестиційну привабливість України.

Попри стратегічну важливість, нині металургія та металообробна промисловість перебувають у стані глибокої системної кризи. Цю ситуацію визначають два взаємопов'язані чинники. По-перше, повномасштабна військова агресія РФ спричинила часткове або повне руйнування виробничих активів, порушення логістичних коридорів, дефіцит енергоресурсів і зниження технологічної стійкості підприємств. По-друге, прискорення євроінтеграційного курсу України та впровадження Європейським Союзом механізму прикордонного вуглецевого коригування з 2026 року зумовлюють необхідність докорінного перегляду екологічних параметрів виробництва, особливо щодо вуглецевої інтенсивності сталі та металопродукції.

Додаткової вагомості проблематиці надає наближення термінів імплементації Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди [4], що визначає екологічні засади роботи великих промислових підприємств. Відповідно до Закону України №3855-IX, з 8 серпня 2025 року розпочинається перехід на систему інтегрованих дозволів на викиди [8], які ґрунтуються на принципах найкращих доступних технологій та методів управління.

Для металообробного сектору ці зміни мають особливо критичний характер. Галузь із властивими їй енергоємними процесами (термічна обробка, гальванічне нанесення покриттів, абразивно-механічне формування поверхонь, зварювальні й різальні операції) генерує широкий спектр забруднювальних речовин – леткі органічні сполуки, дрібнодисперсний пил, сполуки важких металів, технологічні стічні води та шумові навантаження. Саме тому імплементація інноваційних технологій потребує глибокої перебудови технологічних ліній, систем очищення та управління відходами.

У випадку відсутності модернізації українська металообробна продукція може втратити доступ до ринку ЄС через невідповідність екологічним критеріям механізму прикордонного вуглецевого коригування і вимогам Директиви про промислові викиди. Це створює ризики для економічного розвитку держави, водночас відкриваючи можливості для інноваційного оновлення виробництва, зниження викидів та переходу до циркулярних моделей управління ресурсами.

Департаментом екології та природних ресурсів оприлюднено інформацію про роботу підприємств, які найбільше забруднюють довкілля у Запорізькій області, серед яких Товариство з обмеженою відповідальністю «Запорізький ливарно-механічний завод» механізму прикордонного вуглецевого коригування [12].

Метою даної роботи було комплексне дослідження, аналіз та екологічна оцінка впливу виробничої діяльності ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» на стан довкілля, а також обґрунтування рекомендацій щодо впровадження екологічно чистих, низьковуглецевих і ресурсоефективних технологій.

Для досягнення поставленої мети було виконано ряд **завдань**:

- проаналізувати сучасний стан та проблеми металообробного сектору України;
- дослідити виробничо-технологічні процеси ТОВ «ЗЛМЗ» та визначити основні джерела їхнього впливу на компоненти навколишнього природного середовища;
- здійснити оцінювання характеру й масштабів впливу діяльності підприємства на стан атмосферного повітря, водні ресурси, ґрунти, рівень шумового навантаження та утворення відходів;
- оцінити рівні забруднення компонентів довкілля у зоні впливу підприємства та визначено основні екологічні ризики й загрози, пов'язані з його діяльністю в умовах воєнного стану;
- обґрунтувати та запропонувати комплекс заходів щодо впровадження екологічно чистих, енергоефективних і низьковуглецевих технологій з метою зниження негативного впливу підприємства на довкілля.

Об'єктом дослідження обрано виробничо-технологічну діяльність металообробного підприємства ТОВ «ЗЛМЗ» та пов'язані з нею процеси впливу на компоненти навколишнього природного середовища.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Сучасний стан, тенденції розвитку та екологізація металообробної промисловості в контексті євроінтеграції

Сучасний етап розвитку металообробної промисловості у світі та в Україні формується під впливом взаємопов'язаних економічних, технологічних та екологічних чинників, ключовими з яких є глобальна декарбонізація, посилення екологічного регулювання, структурні зрушення в промислових ланцюгах створення вартості та геополітичні виклики. Металообробка, як проміжна й водночас системоутворююча ланка між металургією та машинобудуванням, дедалі більше визначається не обсягами виробництва, а екологічною ефективністю, ресурсозбереженням і відповідністю європейським стандартам.

У глобальному вимірі базовим індикатором стану металообробної промисловості залишається виробництво сирової сталі, яке визначає доступність сировини та цінову кон'юнктуру для подальшої обробки металів. За офіційними даними World Steel Association, світове виробництво сирової сталі у 2024 році становило 1 882,6 млн т, що на 0,5 % менше, ніж у 2023 році (1892,6 млн т) [46]. Така динаміка свідчить про фазу глобальної стагнації металургійного ринку, за якої зростання конкурентоспроможності металообробних підприємств дедалі більше залежить від підвищення технологічної та екологічної ефективності, а не від нарощування фізичних обсягів.

Таблиця 1.1 – Динаміка світового виробництва сирової сталі та місце України (2023–2024 рр.)

Показник	2023 р., млн т	2024 р., млн т	Зміна, %
Світ загалом	1 892,6	1 882,6	–0,5
Україна	6,2	7,6	+21,6
Частка України у світовому виробництві, %	0,33	0,40	+0,07

На основі табличних даних виявлено, що, попри загальносвітове скорочення виробництва сталі, Україна у 2024 році продемонструвала істотне відновлення металургійного виробництва (+21,6 %). Однак навіть за цього зростання частка України у світовому виробництві становить лише $\approx 0,40$ %, що підкреслює високу залежність національної металообробки від експортної орієнтації та відповідності міжнародним екологічним вимогам, насамперед європейським [42, 46].

В умовах євроінтеграції екологізація металообробної промисловості визначається нормативно-правовими рамками Європейського Союзу. Центральне місце серед них посідає Європейський кліматичний закон (Регламент (ЄС) 2021/1119), який юридично закріплює ціль кліматичної нейтральності до 2050 року та проміжне скорочення чистих викидів парникових газів не менш ніж на 55 % до 2030 року (від рівня 1990 р.) [17]. Для промисловості це означає довгостроковий структурний зсув у бік низьковуглецевих технологій та жорсткі вимоги до енергоефективності.

Науковим підґрунтям цих рішень є оцінки Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату. Згідно з доповіддю AR6 WGIII, для утримання глобального потепління на рівні близько 1,5 °C світові викиди мають досягти піку не пізніше 2025 року та скоротитися приблизно на 43 % до 2030 року порівняно з 2019 роком [30, 36]. Водночас UNEP у *Emissions Gap Report 2024* фіксує, що глобальні викиди у 2023 році досягли 57,1 Гт CO₂-екв., збільшившись на 1,3 % порівняно з 2022 роком [43], що свідчить про розрив між задекларованими кліматичними цілями та фактичними трендами.

Таблиця 1.2 – Кліматичні орієнтири та їх значення для металообробної промисловості

Джерело / документ	Ключовий показник	Кількісне значення	Значення для металообробки
IPCC AR6 WGIII	Скорочення глобальних викидів до 2030 р.	–43 % (від 2019 р.)	Необхідність різкого зниження енерго- та вуглецевої інтенсивності
UNEP Emissions Gap 2024	Глобальні викиди у 2023 р.	57,1 Гт CO ₂ -екв.	Підтверджує посилення кліматичного та регуляторного тиску на промисловість
Європейський кліматичний закон	Ціль ЄС	Кліматична нейтральність до 2050 р.	Довгострокова переорієнтація ринків і ланцюгів постачання

Поєднання наукових оцінок IPCC та фактичних даних UNEP свідчить, що екологізація металообробної промисловості є об'єктивною необхідністю, а не політичною декларацією. У цих умовах підприємства, що не адаптуються до вимог декарбонізації, ризикують втратити доступ до ключових ринків збуту, передусім європейських.

Додатковим інструментом екологічного та торговельного тиску є механізм прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ), запроваджений Регламентом ЄС 2023/956. Європейська Комісія офіційно визначає перехідну фазу СВАМ у 2023–2025 рр. та повномасштабне застосування з 2026 року [34]. Хоча СВАМ безпосередньо охоплює передусім металургію (залізо і сталь), його вплив поширюється й на металообробку через вимоги до вуглецевого сліду продукції у виробничих ланцюгах.

В українському контексті екологізація металообробної промисловості закріплюється на законодавчому рівні через прийняття Закону України №3855-IX «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення», який передбачає перехід до системи інтегрованих довікілевих дозволів на основі найкращих доступних технологій.

Таблиця 1.3 – Ключові регуляторні інструменти екологізації металообробної промисловості

Інструмент	Рівень	Сутність вимог	Часовий горизонт
Директива 2010/75/ЄС	ЄС	Інтегроване регулювання викидів, найкращі доступні методи	Чинна
Європейський кліматичний закон	ЄС	–55 % викидів до 2030 р.; нейтральність 2050	2030–2050
СВАМ	ЄС	Вуглецеве коригування імпорту	Повний режим з 2026
Закон України №3855-IX	Україна	Інтегровані довкіллові дозволи, найкращі доступні методи	Повна чинність з 08.08.2025

На підставі аналізу регуляторної бази (табл. 1.3) встановлено, що екологізація металообробної промисловості в Україні є невід’ємною складовою процесу євроінтеграції, доступу до фінансування та збереження експортного потенціалу. Відсутність технологічної модернізації в найближчі роки означатиме не лише екологічні ризики, а й економічну маргіналізацію галузі.

З огляду на викладене, сучасний стан металообробної промисловості характеризується переходом від кількісної моделі розвитку до якісної, екологічно орієнтованої трансформації, у якій вирішальну роль відіграють енергоефективність, зниження промислових викидів, циркулярне використання матеріалів та відповідність нормам ЄС.

Металообробка прямо залежить від доступності й якості металопродукції (прокат, заготовка), а тому виробництво сирової сталі є репрезентативним макроіндикатором.

За даними World Steel Association:

– світове виробництво сирової сталі у 2024 році (з урахуванням оцінок країн, що звітують лише щорічно) становило 1882,6 млн т. У 2023 році – 1892,6 млн т, тобто зміна –0,5%. Дані наведені у таблиці «2024 global crude steel production totals» (пресреліз від 24.01.2025) [46];

– для 71 країни, що подають щомісячну звітність, підсумок Jan–Dec 2024 становив 1839,4 млн т (зміна $-0,9\%$ до 2023), що пояснює різницю між «повним світовим підсумком» і «підсумком 71 країни» (частина країн додається оцінками щорічно) [46].

З огляду на те, що 2024 рік характеризувався відсутністю зростання обсягів виплавки сталі, конкурентоспроможність металообробних підприємств дедалі більше визначається продуктивністю та точністю виробництва, енергоефективністю і дотриманням екологічних стандартів, оскільки надлишкові енерговитрати та підвищені викиди знижують ринкові позиції продукції.

1.2 Методологія оцінки життєвого циклу в металургії

У межах дослідження проаналізовано методологію оцінки життєвого циклу (LCA) як базовий інструмент кількісної оцінки екологічних впливів металургійної продукції на всіх етапах її існування. З'ясовано, що найбільш визнаною та застосовуваною у міжнародній практиці є методологія, регламентована стандартами ISO 14040 та ISO 14044, які визначають структуру LCA, вимоги до якості даних і принципи інтерпретації результатів [19; 37].

Встановлено, що для оцінки кліматичних впливів у металургії доцільно поєднувати повне LCA з розрахунком вуглецевого сліду продукту відповідно до ISO 14067, що дозволяє кількісно визначити обсяг викидів парникових газів у перерахунку на **CO₂-еквівалент** для заданої функціональної одиниці [34].

Згідно з вимогами ISO 14040/14044, методологія LCA включає чотири етапи: визначення мети та області застосування, інвентаризаційний аналіз, оцінку впливів та інтерпретацію результатів. Обґрунтовано, що для металургійної продукції найбільш репрезентативною є функціональна одиниця 1 т сирової сталі або 1 т готового прокату, а рекомендованими межами

системи – cradle-to-gate, що забезпечує порівнянність результатів у міжнародних ланцюгах постачання [37, 46].

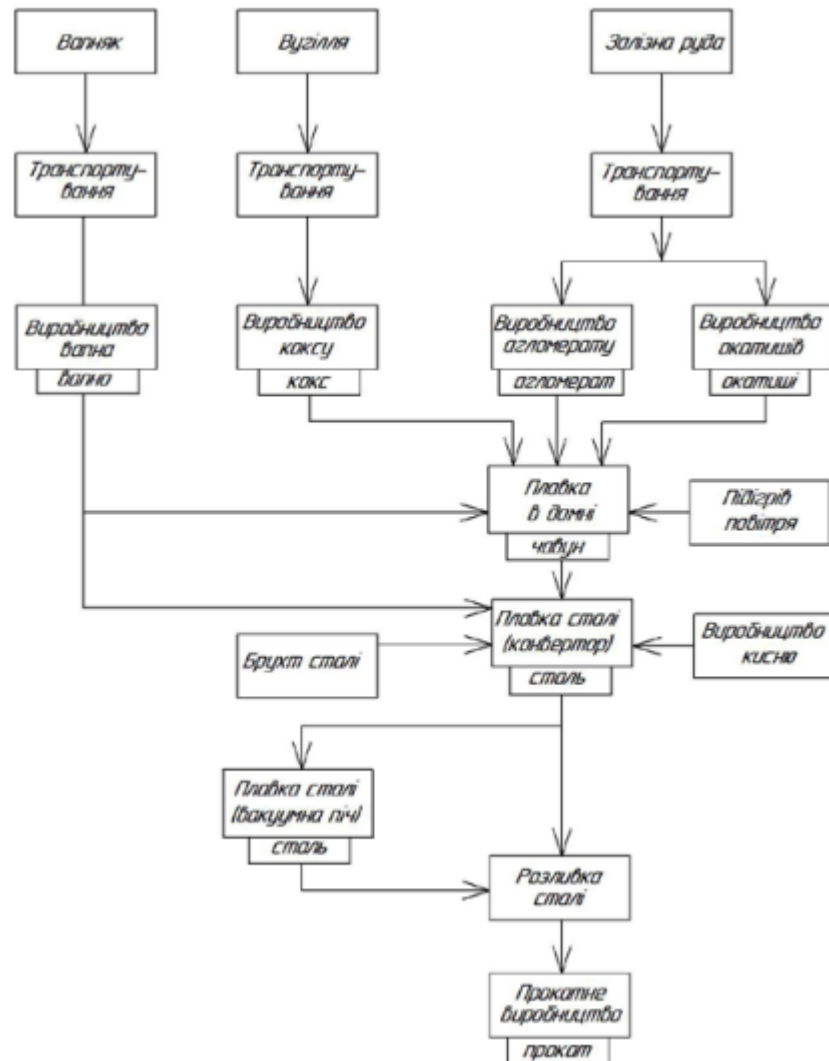


Рисунок 1.1 – Аналіз життєвого циклу та схема трансформації матеріальних потоків у металургійному виробництві [19]

У ході аналізу виявлено, що ключовим елементом LCI для металургії є облік споживання енергії, сировини, допоміжних матеріалів та викидів CO₂, CH₄ і N₂O. Для забезпечення галузевої узгодженості встановлено доцільність використання методології World Steel Association, яка стандартизує підходи до інвентаризації та обліку рециклінгу сталі [46].

Згідно з даними Sustainability Indicators Report 2025 World Steel Association, середньозважена інтенсивність викидів парникових газів у світовій металургії у 2024 році становила 2,18 т CO₂e/т сирової сталі, а

енергоємність – 20,95 ГДж/т [46]. При цьому встановлено, що інтенсивність викидів істотно залежить від технологічного маршруту:

- BF–BOF — 2,66 т CO₂е/т,
- scrap–EAF — 0,71 т CO₂е/т,
- DRI–EAF — 1,66 т CO₂е/т [35].

На основі порівняльного аналізу обґрунтовано, що перехід від доменного маршруту до електродугового з використанням брухту дозволяє знизити кліматичне навантаження майже у 3,7 рази, що підтверджує ключову роль рециклінгу та електрифікації у декарбонізації металургії.

Для узгодження результатів LCA з європейською екологічною політикою досліджено підхід Environmental Footprint (*екологічний слід*) Європейської Комісії, закріплений у Рекомендації (ЄС) 2021/2279, який підвищує порівнянність екологічних показників продукції на ринку ЄС [34, 37].

Таким чином, встановлено, що методологія оцінки життєвого циклу в металургії є науково обґрунтованим інструментом оцінки екологічної ефективності виробництва та ключовою основою для прийняття рішень щодо декарбонізації, впровадження найкращих доступних технологій і підготовки підприємств до вимог Європейського зеленого курсу та механізму вуглецевого коригування.

1.3 Особливості впливу металургійних і металообробних підприємств на довкілля

Функціонування металургійних та металообробних комплексів супроводжується інтенсивним техногенним тиском на всі депонуючі середовища. У ході дослідження проаналізовано, що специфіка цього впливу визначається поєднанням масштабних атмосферних емісій, накопиченням токсичних твердих відходів та скиданням складних за хімічним складом стічних вод.

У результаті аналізу технологічних циклів (плавка, термічна обробка, механічне очищення) встановлено, що основними забруднювачами атмосфери є газоподібні сполуки та дрібнодисперсні аерозолі [2, 23-26].

З'ясовано, що діоксид сірки та діоксид азоту утворюються переважно в результаті високотемпературних процесів спалювання палива та плавлення металу. Їхня присутність в атмосфері призводить до формування кислотних опадів, що дестабілізує локальні екосистеми.

Досліджено, що металообробні підприємства є потужними джерелами пилу. Особливу небезпеку становлять частки PM_{2.5}, які через малий розмір здатні проникати глибоко в респіраторну систему людини, адсорбуючи на своїй поверхні іони важких металів.

Виявлено, що під час процесів знежирення, фарбування та використання мастильно-охолоджувальних рідин в повітря виділяються вуглеводні, що сприяє утворенню приземного озону та фотохімічного смогу.

Під час вивчення стану територій, прилеглих до промислових майданчиків, виявлено, що ґрунтовий покрив виступає основним акумулятором техногенного забруднення. Встановлено, що внаслідок сухого та мокрого випадання атмосферних емісій у ґрунтах накопичуються пріоритетні токсиканти: свинець, кадмій, хром та цинк.

Обґрунтовано, що тривале накопичення важких металів веде до деградації мікробіоценозів та порушення ферментативної активності ґрунту, що робить ці території непридатними для сільськогосподарського використання та створює ризики міграції металів у трофічні ланцюги.

Згідно даних Програми ООН з довкілля [43] металургійний та металообробний сектори залишаються одними з найбільших споживачів води та продуцентів небезпечних відходів. З'ясовано, що стічні води підприємств містять високі концентрації завислих речовин, нафтопродуктів та розчинених солей важких металів, що вимагає впровадження багатоступеневих систем очищення перед їх скиданням у гідрографічну мережу. Вивчено, що технологічні відходи (шлами, окалина, відпрацьовані формувальні суміші)

становлять значну частку загального обсягу відходів виробництва. Досліджено, що неналежне складування цих матеріалів на відкритих майданчиках призводить до вимивання токсичних сполук у підземні водоносні горизонти.

На основі вищевикладеного обґрунтовано, що вплив металообробних підприємств має комплексний характер. Успішна мінімізація цього впливу можлива лише за умови впровадження концепції «чистого виробництва», яка передбачає не тільки очищення викидів «на кінці труби», а й глибоку модернізацію самих технологічних процесів з метою декарбонізації та зменшення ресурсоемності.



Рисунок 1.2 – Диференціація основних видів промислових відходів як джерел потенційної екологічної небезпеки [12]

У процесі аналізу результатів інвентаризації відходів (рис. 1.2) встановлено, що структура техногенних утворень металургійних підприємств має асиметричний характер із домінуванням багатотоннажних фракцій. Домінуючою складовою є шлаки, частка яких становить 64%. Це свідчить про те, що основний екологічний та ресурсний потенціал модернізації зосереджений саме у сфері переробки шлакових відвалів (наприклад, для дорожнього будівництва або виробництва будівельних матеріалів). Металобрухт займає 17%, що вказує на можливості внутрішнього рециклінгу відповідно до принципів Зеленого європейського курсу. Сумарна частка шламу, пилу та окалини становить 13% і є екологічно найбільш небезпечною

через ризик аерогенного рознесення та вимивання важких металів. Мінеральні та інші відходи (разом 6%) мають незначну частку, однак потребують спеціалізованих методів утилізації.

Подана матриця (рис. 1.3) відображає системний, багатокomпонентний характер впливу техногенних утворень металургійного профілю на природні та соціально-екологічні системи, де первинне забруднення ґрунтів і вод виступає тригером каскадних змін у суміжних компонентах довкілля.

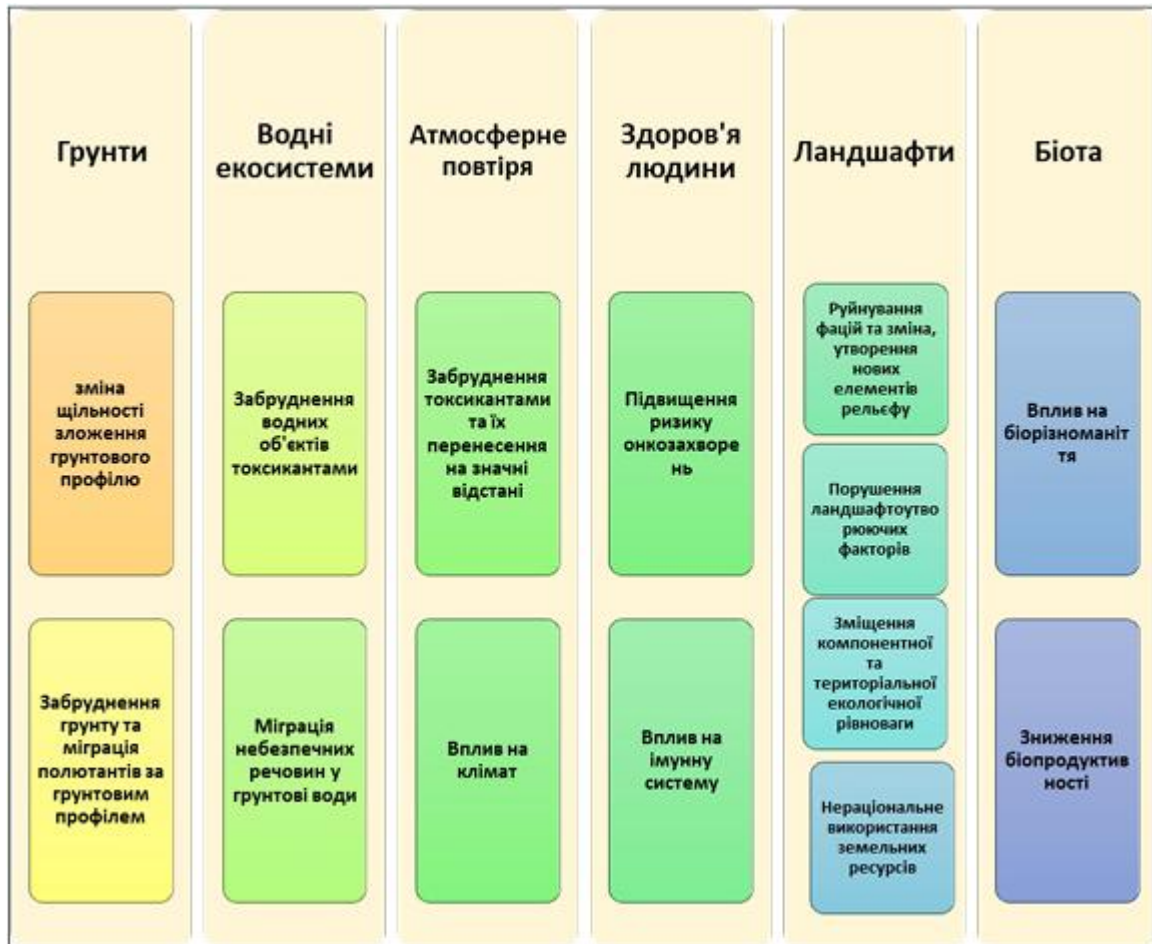


Рисунок 1.3 – Матриця інтегрального впливу техногенних утворень металургійного профілю на стійкість природних ландшафтів та імунний статус населення [14]

Важливо зазначити, що висока частка шлаків у 2025 році розглядається не як екологічний тягар, а як вторинна сировина. Впровадження технологій сепарації та дроблення шлаків дозволить підприємствам не лише зменшити екологічний податок, а й отримати додатковий прибуток за рахунок реалізації щебеню та металевого концентрату.

При дослідженні наслідків накопичення багатотоннажних відходів з'ясовано, що збільшення обсягів утворення шлаків генерує каскад екологічних ризиків для всіх природних середовищ (рис. 1.4):



Рисунок 1.4 – Схема мультимодального впливу багатотоннажних відходів на компоненти довкілля та показники здоров'я населення [2]

З'ясовано, що сукупна дія міграції токсикантів у водні об'єкти та ґрунтові води, їх атмосферного перенесення на значні відстані й накопичення у ландшафтах зумовлює порушення природної рівноваги, деградацію біоти та трансформацію рельєфу. Особливо критичним є зв'язок між забрудненням атмосферного повітря та підвищенням ризиків для здоров'я населення, зокрема зростанням онкологічних і імуносупресивних ефектів. У цілому матриця наочно підтверджує, що техногенні утворення металургійного походження формують інтегральний екологічний ризик, який проявляється одночасно на рівні природних ландшафтів і імунного статусу людини, що обґрунтовує необхідність комплексного підходу до їх екологічної оцінки, управління та мінімізації негативного впливу.

Встановлено, що складування відходів призводить до руйнування енергетичного балансу територій, засолення ґрунтів та формування геохімічних аномалій через міграцію поллютантів. Досліджено, що вимивання хімічних сполук ($\text{Fe}^{2+,3+}$, Al, Cl, SO_4 , NO_x) зі шлакових відвалів призводить до критичної зміни рН водних об'єктів (від 4,4 до 11,0), що провокує загибель біоти. Виявлено, що аерогенне винесення пилу знижує прозорість атмосфери та сприяє утворенню смогу.

Обґрунтовано, що тривале вдихання пилу з поверхні відвалів корелює із високим рівнем захворюваності на пневмоконіози, серцево-судинні та онкологічні патології [45].

На основі проведеного аналізу встановлено, що існуюча модель управління відходами потребує радикальної екологізації. Обґрунтовано, що впровадження технологій переробки шлаків у будівельні матеріали та регенерації металовмісних шлаків дасть змогу не лише знизити рівень деградації екосистем, а й мінімізувати ризики для здоров'я населення в зоні впливу підприємства.

2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальна виробнича характеристика підприємства

У 2025 році промисловий комплекс України опинився в епіцентрі безпрецедентного історичного шторму, де перетинаються вектори екзистенційної загрози через повномасштабну війну та імперативи прискореної євроінтеграції.

ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» (далі – ТОВ «ЗЛМЗ»), код ЄДРПОУ 32729463) [18], що є стратегічним підприємством групи Метінвест, функціонує у прифронтовому Запоріжжі. Підприємство стикається з подвійним викликом: необхідністю забезпечення фізичної стійкості виробництва під постійними ракетними обстрілами та одночасною підготовкою до роботи в умовах єдиного ринку ЄС, бар'єром до якого стає механізм транскордонного вуглецевого регулювання.



Рисунок 2.1 – ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод»

ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» є багатoproфільним підприємством металургійного та машинобудівного профілю, створеним 1 серпня 2016 року на базі виробничих потужностей комбінату ПАТ «Запоріжсталь» [18]. Підприємство функціонує як виробничий комплекс із замкнутим циклом, що дозволяє випускати продукцію від етапу лиття до фінішної механічної обробки та складання вузлів.

Виробнича структура заводу включає три основні цехи, які визначають специфіку техногенного навантаження на довкілля:

1. *ливарний цех* – основне джерело пилогазових викидів та специфічних забруднювачів (фенол, формальдегід);
2. *механічний цех* (з ковальським відділенням) – джерело утворення відходів металообробки та масляних аерозолів;
3. *цех металоконструкцій* – спеціалізується на зварювальних та складальних роботах.

Юридична адреса та основний виробничий майданчик розташовані у м. Запоріжжя (вул. Південне шосе, 72). Також підприємство має відокремлений промисловий майданчик у м. Кривий Ріг (вул. Заводська, 1), де реалізуються проекти з автономного водопостачання.

Основний вид економічної діяльності у відкритих реєстрах – КВЕД 25.62 «Механічне оброблення металевих виробів».

Завод спеціалізується на виготовленні металургійного обладнання, запасних частин та виробів вагою від 300 г до 30 т. Ключовими технологічними переділами є:

- виробництво виливниць для металургійних заводів (проектна потужність – 360 тис. т/рік, фактично досягнута – 423 тис. т/рік);
- виготовлення фасонного лиття з легованих сталей, чавуну та кольорових металів;
- механічна обробка деталей, термічна обробка та наплавлення поверхонь.

2.2 Фізико-географічна характеристика району розташування підприємства

Підприємство розташоване у Запорізькій області, у великому промисловому вузлі південно-східної України, що характеризується високою концентрацією джерел техногенного навантаження (металургія, енергетика,

машинобудування, транспортна інфраструктура).

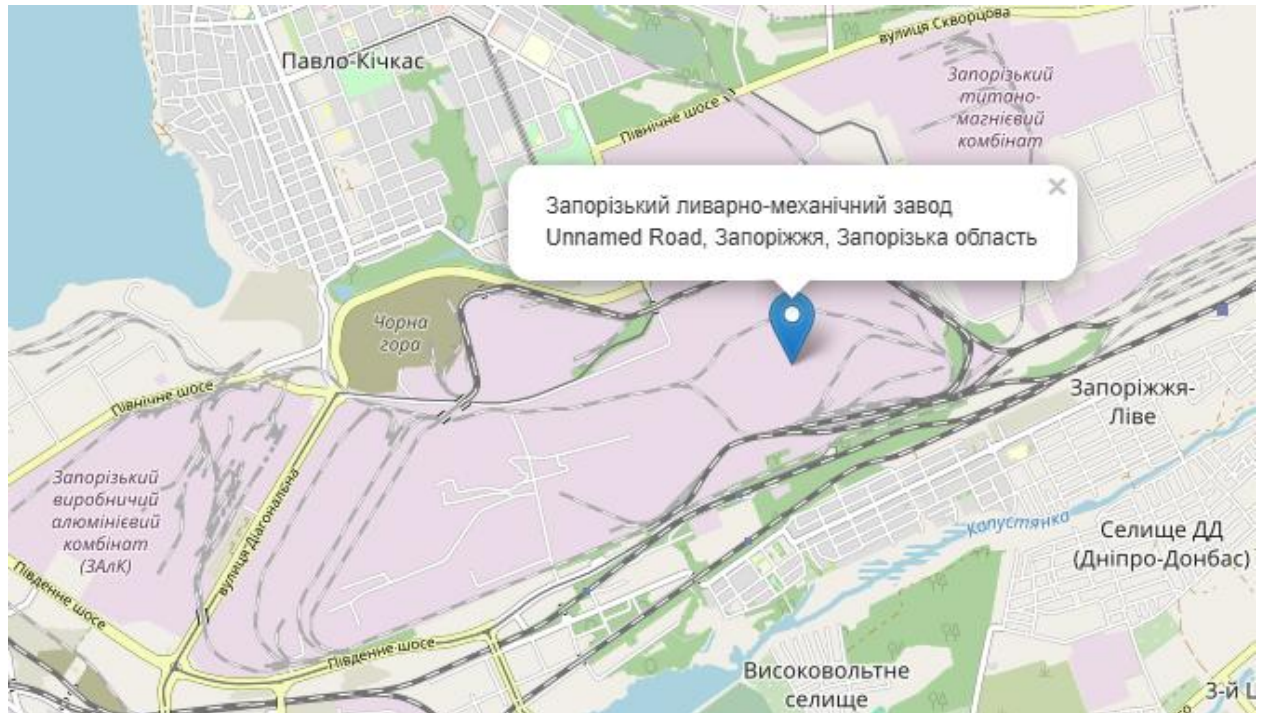


Рисунок 2.2 – Картографічна схема розташування промислового майданчика ТОВ «ЗЛМЗ» у структурі Запорізького промислового вузла

Природно-географічні умови району визначаються степовою зоною з ризиками пилових перенесень і періодів атмосферної посухи, що підсилює значущість контролю пилогазових викидів і поводження з сипкими матеріалами (піски, формувальні суміші, пил уловлювання) [28]. В умовах кліматичних змін для регіону фіксується тенденція потепління за кліматичний період 1991–2020 рр. (за повідомленнями Запорізького обласного центру з гідрометеорології).

Клімат характеризується як *степовий атлантико-континентальний*. Середньорічна температура повітря становить $+10,4^{\circ}\text{C}$. Літо переважно спекотне та сухе (середня температура липня $+23,5^{\circ}\text{C}$, абсолютний максимум $+40,0^{\circ}\text{C}$). Зима помірно-холодна, малосніжна (середня температура січня $-2,5^{\circ}\text{C}$).

Річна кількість опадів становить у середньому 527 мм, при цьому їх випадіння є нерівномірним, часто у вигляді сильних злив у теплий період року.

Переважають вітри північного напрямку. Середньорічна швидкість вітру — 1,5 м/с, однак можливі шквали до 40 м/с [28].

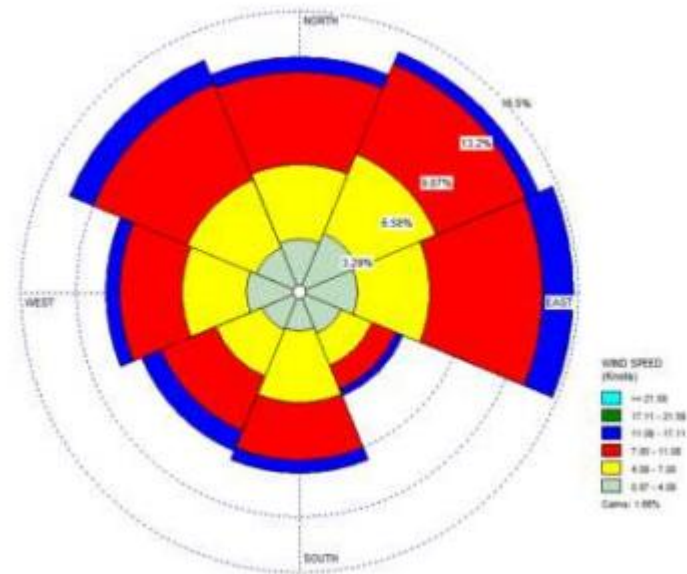


Рисунок 2.3 – Характеристика вітрового режиму м. Запоріжжя як чинника переносу антропогенних домішок (2022 р.) [12]

Практично це означає зростання частоти епізодів високих температур і метеоумов, що ускладнюють розсіювання домішок (підвищений ризик приземних концентрацій під час штилів/інверсій), а також підвищують потребу у стабільному водозабезпеченні для технологій охолодження та санітарно-гігієнічних потреб.

Таблиця 2.1 – Район розташування та екологічні передумови оцінки ризиків

Компонент	Характеристика для Запоріжжя	Екологічне значення для ЗЛМЗ
Тип території	великий промисловий вузол	кумулятивне навантаження, важливість фонових концентрацій
Кліматичний тренд	потепління за 1991–2020 рр. (регіональні оцінки)	ризик зростання пилових подій, частіших НМУ для розсіювання домішок
Ризики воєнного часу	перебої енергопостачання/логістики	потреба енергонезалежних рішень очищення/моніторингу

Місто розташоване в межах *Українського кристалічного щита* [16]. Лівобережна частина, де знаходиться завод, характеризується перекриттям кристалічних порід потужним шаром осадових відкладів (піщано-глинисті породи, леси). Запаси підземних вод у цьому районі незначні. Головною водною артерією є річка Дніпро. Гідрологічний режим зазнав суттєвих змін внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС (06.06.2023), що призвело до зниження рівня води та оголення берегів. Також гідрографічна мережа включає малі річки (Суха та Мокра Московка) [16].

У межах промислової зони ґрунти зазнали значного техногенного впливу («запечаткування», забруднення важкими металами та нафтопродуктами) і трансформувалися у техноземи.

Умови промислового вузла та кліматичні тренди підсилюють вимоги до надійності пилогазоочистки й виробничого контролю, а воєнні ризики роблять критичними резервування енергоживлення та технологічну стійкість систем очищення.

2.3 Основні види технологічних процесів у металообробці та їх екологічні аспекти

Для ливарно-механічного профілю визначальними є:

- підготовка формувальних матеріалів (піски/глини/регенерат, формувальні суміші);
- формування, заливання, вибивання, очищення та обрубка виливків;
- термічна обробка (печі, нагрівальні агрегати);
- механічна обробка (токарні/фрезерні/шліфувальні операції);
- виготовлення металоконструкцій (різання, зварювання, зачистка, можливі лакофарбові операції).

У повідомленні про намір отримати дозвіл на викиди для ТОВ «ЗЛМЗ» окремо зазначені процеси, що формують найбільший внесок у викиди, зокрема *пересипання (перевалка) формувальних матеріалів, сушіння в*

барабанах, термічна обробка виливків, сушіння форм [21].

Ливарне виробництво є найбільш екологічно небезпечним етапом. Воно включає приготування формувальних сумішей, плавлення металу, заливку форм та вибивку литва.

Слід зазначити, що використання індукційних печей EGES та сушильних барабанів супроводжується викидами продуктів горіння та пилу. Критичним еко-фактором є використання органічних зв'язуючих у формувальних сумішах, термічна деструкція яких при контакті з розплавленим металом призводить до емісії **фенолу** та **формальдегіду**.

Підприємство виробляє як сталеве (марки 15Л-50Л, 40ХЛ), так і чавунне (СЧ10-СЧ20) та кольорове лиття (бронзи БрА9ЖЗЛ), що формує поліметалічний склад пилу (вміс сполук міді, цинку, свинцю, марганцю).

Механічний цех оснащений токарними, фрезерними, зуборізними та шліфувальними верстатами. Основним забруднювачем на цьому етапі є мастильно-охолоджувальні рідини. Згідно з документацією, підприємство використовує емульсол (склад: мінеральне масло, сода, нітрит натрію). У процесі обробки металів різанням утворюється дрібнодисперсний масляний туман та металевий пил. Відпрацьовані МОР є небезпечними рідкими відходами, що потребують утилізації [46].

Ковальсько-термічне відділення виконує загартування, відпал та нормалізацію деталей.

Процеси нагріву заготовок у печах супроводжуються спалюванням природного газу, що генерує викиди парникових газів (CO_2 , CH_4) та оксидів азоту (NO_x). Загальний обсяг викидів парникових газів підприємства становить 6,6 тис. т/рік. Це вимагає обліку згідно з методологією IPCC.

Гальванічні технології та наплавлення. Хоча у доступних джерелах немає прямої згадки про окремий гальванічний цех, технологічний процес включає використання кислот (сірчаної) та лугів (натр їдкий), що вказує на процеси травлення або хімічної обробки поверхні. Дільниця наплавлення є джерелом зварювальних аерозолів, що містять сполуки марганцю та хрому

(VI), які є канцерогенами.

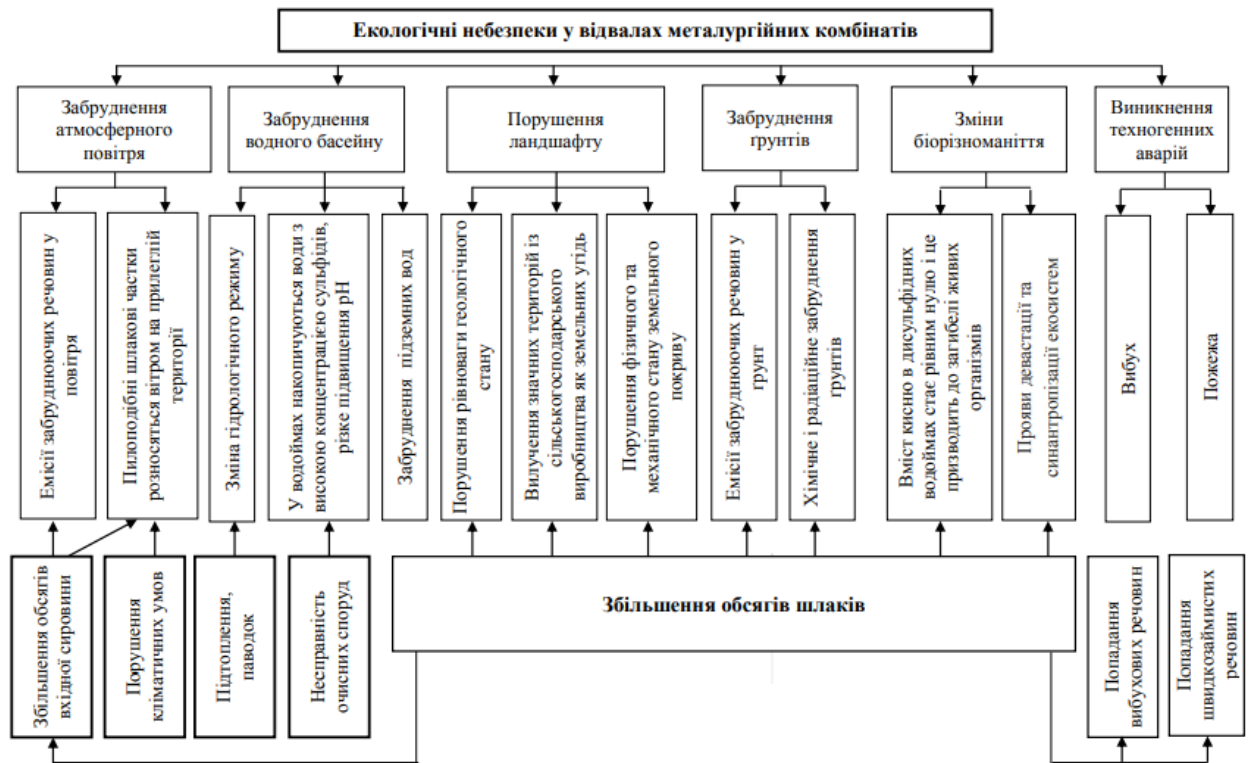


Рисунок 2.4 – Концептуальна схема детермінації екологічних ризиків та мультимодального впливу збільшення обсягів утворення шлаків на компоненти біосфери [19]

2.4 Обґрунтування методологічного підходу до екологічної оцінки техногенного навантаження металообробного виробництва

Металообробна промисловість є одним із ключових джерел техногенного навантаження на компоненти довкілля через використання енергоємних технологій, хімічних реагентів та генерацію багатокомпонентних забруднень, зокрема викидів в атмосферу, скидів у водні об'єкти, забруднення ґрунтів важкими металами та утворення промислових відходів. Тому екологічна оцінка впливу такого підприємства, як ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод», має ґрунтуватися на багаторівневому міждисциплінарному підході, що враховує складність структури виробництва, просторову специфіку розміщення та системні взаємозв'язки з довкіллям.

У роботі використано комплексну методологію, яка включає такі елементи:

- інвентаризаційний аналіз джерел впливу на основі даних дозвільної документації, екологічної звітності підприємства та моніторингових баз (зокрема Держекоінспекції та системи EcoCity);
- гідрохімічна оцінка якості поверхневих та стічних вод за ключовими показниками згідно з Наказом № 5 Міндовкілля від 02.01.2014 (з оновленнями) та Водною рамковою директивою ЄС 2000/60/EC;
- оцінка атмосферного забруднення із залученням супутникових даних Copernicus та відкритих спостережень (зокрема мережа SaveDnipro);
- модуль оцінки вуглецевої інтенсивності на основі рекомендацій IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2023 refinement) і дефолтних коефіцієнтів викидів (Tier 1);
- SWOT-аналіз екологічного менеджменту підприємства для ідентифікації вразливостей, потенціалу екологізації виробництва та шляхів впровадження екологічно чистих технологій.

Обрана методологія відповідає принципам інтегрованої оцінки впливу відповідно до міжнародних стандартів ISO 14001:2015 та настанов Європейської комісії (EC BREF: довідкові документи з найкращих доступних методів). Її адаптація до умов України базується на положеннях Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» № 2059-VIII від 23.05.2017, Водного кодексу України, а також методичних документів ДСУ [3-6, 8-11].

Таким чином, системний характер обраної методології дозволяє забезпечити комплексну та достовірну екологічну оцінку функціонування металообробного підприємства та сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо зменшення його техногенного впливу.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Технологічна детермінація та оцінка емісійного впливу на стан атмосферного повітря

В умовах промислової агломерації Запоріжжя, де частка металургійного виробництва у формуванні загального техногенного навантаження становить 90,7% (рис. 3.1), діяльність ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» потребує комплексної екологічної оцінки. Підприємство ідентифіковано як суб'єкт господарювання, що входить до переліку основних забруднювачів міста, формуючи специфічний фон за пріоритетними токсикантами.



Рисунок 3.1 – Питома вага основних видів економічної діяльності у формуванні загального техногенного навантаження на повітряний басейн Запорізької області [12]

Для отримання верифікованих даних щодо стану повітряного басейну використовується цифрова платформа **SaveEcoBot**, яка агрегує інформацію з мережі датчиків у дистанційному форматі <https://www.saveecobot.com/maps> [40]

Наукове обґрунтування впливу воєнних факторів на екологічну безпеку атмосфери представлено у фундаментальному звіті міжнародної ініціативи «Чисте повітря для України» <https://cleanair.org.ua/publication/zpaq2022/>.

3.1.1 Технологічні детермінанти утворення емісій

Дослідженням встановлено, що профіль забруднення атмосфери детермінується специфікою пірометалургійних та механічних процесів. Згідно з офіційною звітністю, під час виробничої діяльності в атмосферу надходить **48 найменувань забруднюючих речовин** від організованих та неорганізованих джерел. Пріоритетними агентами впливу є пил (зважені частки), діоксид азоту, фенол, формальдегід та специфічні токсиканти: фтористий водень і сполуки важких металів [18, 21].

Дослідженням встановлено пряму кореляцію між інтенсифікацією виробничих процесів та рівнем емісійного навантаження. Визначальним фактором стало перевищення фактичних обсягів виробництва над проєктними: при проєктній потужності 360 тис. т/рік фактичний обсяг випуску виливниць досяг 423 тис. т/рік, що призвело до пропорційного зростання концентрації викидів на промисловому майданчику.

Аналіз технологічного регламенту дозволив виділити ключові джерела генерації пріоритетних забруднювачів:

1. **Ливарне виробництво (пірометалургійний цикл)** – цей переділ є домінуючим джерелом полікомпонентного забруднення. Критичні екологічні аспекти етапу обумовлені фізико-хімічними процесами при високих температурах:

1. термічна деструкція органічних компонентів, оскільки у ливарному цеху при контакті розплавленого металу (температура процесу досягає 1600°C) з ливарними формами відбувається вигорання (піроліз) органічних зв'язуючих матеріалів. Цей процес є джерелом емісії специфічних органічних токсикантів, зокрема **фенолу** та **формальдегіду**. Згідно з даними інвентаризації, джерела викидів ливарного цеху генерують також **бенз(а)пірен** – канцерогену 1-го класу небезпеки;

Зокрема, за даними міської екологічної програми, сумарний викид **фенолу** по Запоріжжю у 2022 році склав ~9,8 т/рік, значна частина якого

формується саме підприємствами металургійного комплексу (в тому числі ЗЛМЗ).

2. формування мінеральних та металевих аерозолів. Процеси вибивки литва, приготування формувальних сумішей та механічної обробки (зачищення) супроводжуються утворенням пилу з високим вмістом діоксиду кремнію ($\text{SiO}_2 > 70\%$), що створює ризик силікозу. Інвентаризація джерел фіксує, що в зоні вибивання концентрація пилу може досягати $20\text{--}45 \text{ г/м}^3$, а при піскоструминній обробці – до 20 г/м^3 .

Такий **металевмісний пил** утворюється практично на всіх стадіях виробництва – від підготовки шихти й формувальних сумішей до вибивання та зачистки виливків. За даними міжнародних екологічних організацій, подібні пилові викиди металургійних і ливарних підприємств містять значні кількості важких металів (насамперед свинцю та міді) і належать до найнебезпечніших для біосфери забруднювачів.

2. Механічна обробка та зварювання. У цехах металоконструкцій та механічної обробки ідентифіковано специфічні аерозолі. Зварювальні роботи генерують дим (концентрація $5\text{--}20 \text{ мг/л}$) із вмістом твердої фази металів (Mn, Pb, Cr(VI), Ni, Cu) та газових домішок (O_3 , CO, NO_2). Присутність нейротоксичного марганцю та сполук хрому вимагає посиленого контролю робочої зони. Окрім того, використання мастильно-охолоджувальних рідин призводить до утворення масляного туману (вуглеводні), що є прекурсором фотохімічного смогу.

3. Енергетичні процеси. Експлуатація сушильних барабанів та термічних печей, що працюють на природному газі, обумовлює викиди продуктів горіння: оксидів азоту, оксиду вуглецю та парникових газів (корелює з кліматичними змінами та формуванням кислотних опадів).

Інвентаризація джерел викидів ТОВ «ЗЛМЗ» підтвердила його належність до I–II групи об'єктів, що здійснюють значний антропогенний тиск на довкілля Запоріжжя. Функціонування в межах промислового вузла зумовлює кумулятивність аерогенного впливу та високу чутливість

селітебних зон до забруднення повітря.

Таблиця 3.1 – Інвентаризація основних джерел забруднення атмосферного повітря на ТОВ «Запорізькому ливарно-механічному завод»

Процес	Основні забруднювачі	Типові концентрації /обсяги	Період та частота викидів	Системи контролю
Вибивання виливків	Пил кварцу (PM ₁₀ , PM _{2.5}), Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , органічні залишки	20–45 г/м ³ в прямій близькості; 0,5–2 кг/год загально	Безперервно під час вибивання	Мокра система вибивання, рукавні фільтри, циклони
Чистка (піскоструй)	Пил кварцу, металевий пил	6–8 г/м ³ в цеху; 20 г/м ³ біля точки обробки	Безперервно	Вакуумна система, рукавні фільтри
Плавлення в індукц. печах	Fe ₂ O ₃ , ZnO, PbO, SiO ₂ , мінеральний пил	2–10 г/м ³ (після очистки <50 мг/Нм ³)	Безперервно	Рукавні фільтри, електростатичні осаджувачі
Зварювання	Дим дуги (Fe, Mn, Zn, Cr, Ni), озон, CO, CO ₂ , NO ₂	5–20 мг/м ³ диму при локальний вентиляції	При кожній операції зварювання	Витяжна локальна вентиляція, рукавні фільтри
Стержневарення	Летючі органічні сполуки, формальдегід, фенол, аміни	0,5–2 г/м ³ (залежно від каталізатора)	Під час впорскування газу	Адсорбція на активованому вугіллі, спалювання
Різання металу (газо-пальник)	NO ₂ , N ₂ O, CO, CO ₂	200–500 мг/Нм ³ для NO ₂	При кожному різанні	Вентиляція, спалювання залишків газів
Фарбування	Летючі органічні сполуки	0,1–0,5 г/м ³	При нанесенні фарби	Малярні камери з вентиляцією, сорбенти

Дані табл. 3.1 демонструють, що, незважаючи на наявність систем очищення (рукавні фільтри, циклони), залишкові концентрації дрібнодисперсного пилу та специфічних аерозолів (Mn, Cr, Pb) у зонах зварювання та плавки залишаються фактором ризику. Висока дисперсність

пилу (PM_{2.5}) сприяє його транскордонному перенесенню та осіданню на ґрунтах прилеглих урбанізованих територій.

3.1.2 Оцінка впливу на якість повітряного басейну

Аналіз впливу ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» на стан атмосферного повітря базується на комплексному підході, що враховує дані інвентаризації джерел викидів, результати державного моніторингу в агломерації Запоріжжя та дані незалежних спостережень (мережа Eco City).

Потенційний валовий викид забруднюючих речовин від ТОВ «ЗЛМЗ» (без урахування парникових газів) оцінюється приблизно в **0,148 тис. тонн на рік**. Хоч ця величина є порівняно невеликою на тлі металургійних гігантів повного циклу (для порівняння, сумарні викиди ПАТ «Запоріжсталь» в 2021 році перевищували 50 тис. т, ТОВ «ЗЛМЗ» входить до числа основних промислових забруднювачів міста за впливом на окремі показники якості повітря [20]).

З'ясовано, що енергетичні аспекти підприємства безпосередньо корелюють із глобальними кліматичними викликами. Щорічна емісія парникових газів (CO₂, CH₄, N₂O) складає 6,6 тис. т, що диктує необхідність декарбонізації в межах Зеленого європейського курсу. Також виявлено, що робота термічних печей на природному газі сприяє накопиченню оксидів азоту, середньорічні концентрації яких у 2022 році перевищували норму в 1,2 рази.

Структура викидів характеризується полікомпонентністю. До переліку основних поліютантів входять: речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (пил), діоксид азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, а також специфічні речовини – фтористий водень, ціаністий водень, кислота сульфатна, натрію гідрооксид.

Слід відмітити, що хоча валовий обсяг викидів (0,148 тис. т) є помірним порівняно з металургійними гігантами повного циклу, висока токсичність інгредієнтів (I-II клас небезпеки) створює значний інгаляційний ризик для

населення прилеглих житлових масивів Заводського району.

Для верифікації реального впливу підприємства на стан довкілля здійснено аналіз даних регіонального моніторингу, наведених у «Звіті про стратегічну екологічну оцінку м. Запоріжжя» (2024 р.) [12].

У 2022 році на території м. Запоріжжя зафіксовано суттєве зниження загальних валових викидів від стаціонарних джерел до **46,4 тис. т** (що становить 68,6% від рівня 2021 року). Це обумовлено спадом промислового виробництва внаслідок воєнних дій. Проте, незважаючи на зменшення валових показників, концентрації специфічних забруднюючих речовин, характерних для викидів ТОВ «ЗЛМЗ», залишаються на критичному рівні.

За даними ВООЗ, фракції PM2.5 та PM10, що містять ці метали, є критичним фактором ризику для здоров'я населення. У 2022 році в Запоріжжі [12, 13, 45] фіксувалися перевищення нормативів по PM2.5 протягом 72 діб, внесок у що робить і ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод».

Згідно з даними WHO Global Air Quality Guidelines, безпечний рівень PM2.5 становить 5 мкг/м³. Перевищення, зафіксовані у Запоріжжі, свідчать про високий аерогенний ризик.

Таблиця 3.2 – Характеристика стану атмосферного повітря м. Запоріжжя за показниками середньорічного перевищення гігієнічних нормативів, мг/м³

Забруднюючі речовини	Рік				
	2018	2019	2020	2021	2022
Двоокис азоту	2,0	2,0	1,8	1,8	1,2
Двоокис сірки	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
Окис азоту	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
Окис вуглецю	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Пил	0,7	0,8	0,7	0,9	0,7
Фенол	2,0	2,0	2,0	2,0	1,7
Фтористий водень	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0
Хлористий водень	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Формальдегід	1,3	1,7	1,7	1,7	1,7
Сульфати розчинені	-	-	-	-	-
Сірководень	-	-	-	-	-

Аналіз представлених даних (табл. 3.2) середньорічних концентрацій

свідчить про стійке техногенне навантаження на атмосферу міста протягом досліджуваного періоду, навіть на тлі загального зниження викидів у воєнний період (з 64,07 тис. т у 2022 р. до 52,11 тис. т у 2023 р.). Загальна кількість проб із перевищенням гігієнічних нормативів (17% від загального масиву) вказує на стабільно незадовільний стан повітряного середовища, що вимагає негайного впровадження інтегрованих довгільних дозволів. Протягом 2018–2021 рр. концентрації фенолу утримувалися на рівні 2,0 ГДК, що свідчить про хронічне забруднення відходами коксохімічного та металургійного виробництва. Незначне зниження до 1,7 ГДК у 2022 році, ймовірно, корелює зі зміною режимів роботи великих промислових об'єктів у воєнний період.

Оксиди азоту (в перерахунку на NO_2) та діоксид сірки входять до переліку основних забруднюючих речовин заводу.

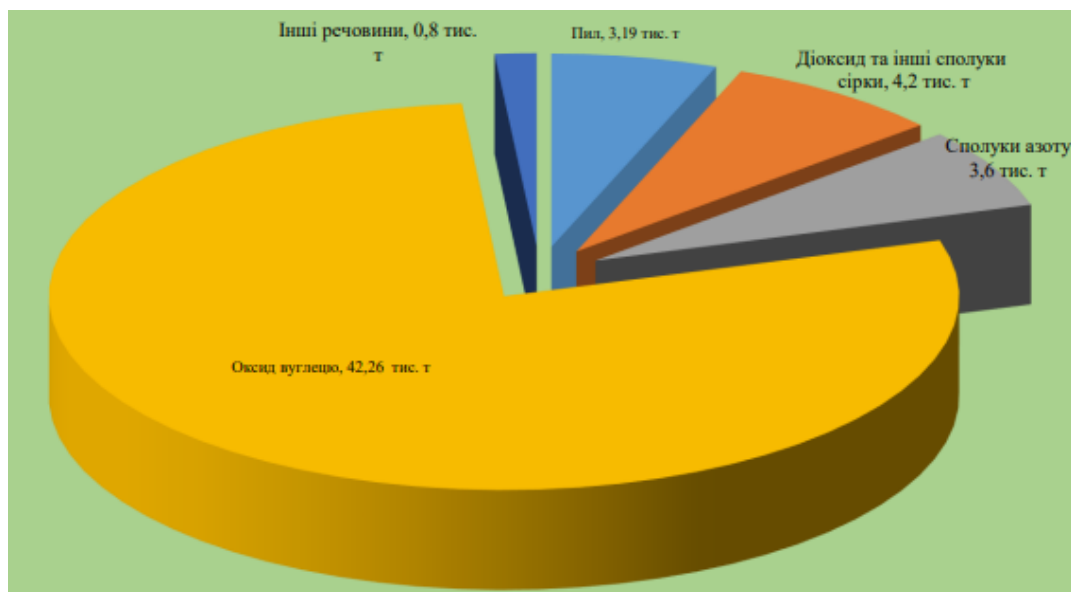


Рисунок 3.2 – Компонентна структура антропогенної емісії основних політантів у повітряний басейн Запорізького регіону (2024 р.)

Згідно з даними Запорізького обласного центру з гідрометеорології, у 2022 році в місті фіксувалися перевищення середньорічних концентрацій діоксиду азоту в 1,2 рази (1,2 ГДК), а максимальні разові концентрації досягали 1,0 ГДК. ТОВ «ЗЛМЗ» визначено як одне з підприємств, що формує цей фон.

NO₂ є прекурсором утворення тропосферного озону та вторинних аерозолів, що підсилює негативний вплив на респіраторну систему населення.

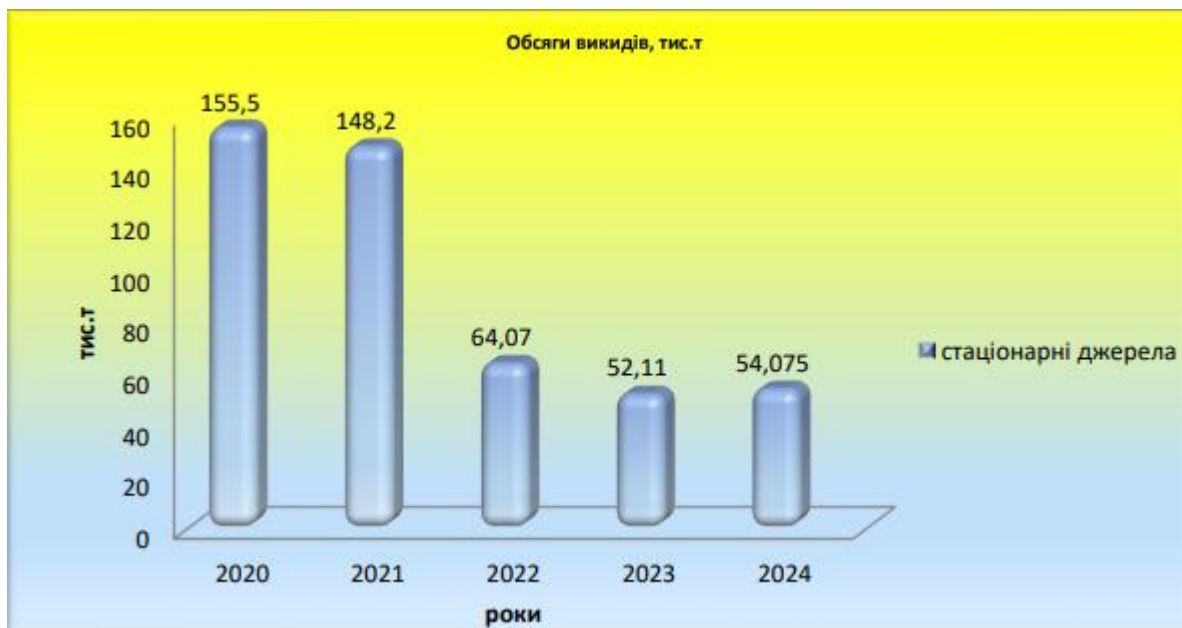


Рисунок 3.3 – Часова варіабельність антропогенного навантаження на атмосферне повітря Запорізького регіону [12]

На графіку 3.3 простежується чітка тенденція зниження загального обсягу викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря від стаціонарних джерел у Запорізькому регіоні впродовж 2020–2024 років. У 2020 році фіксується максимальний рівень – 155,5 тис. т, тоді як у 2023 році – мінімальний (52,11 тис. т), що свідчить про скорочення більш ніж у 2,9 раза. У 2024 році обсяг викидів дещо підвищився (до 54,075 тис. т), що може бути пов'язано з частковою стабілізацією промислового виробництва після пікового зниження.

Таке зменшення, ймовірно, є наслідком низки чинників: скорочення промислової активності у зв'язку з воєнними діями, модернізації окремих виробничих потужностей, посилення регуляторного контролю та часткового переходу до менш вуглецеємних технологій. Водночас зростання у 2024 році сигналізує про необхідність системної екологізації промисловості на етапі відбудови.

За даними ДУ «Запорізький ОЦКПХ МОЗ», у 2022 році в місті зафіксовано критичні перевищення нормативів ВООЗ:

- по $PM_{2.5}$ – протягом 72 діб (концентрації 16,0–181 $\text{мкг}/\text{м}^3$);
- по PM_{10} – протягом 18 діб (46,0–184 $\text{мкг}/\text{м}^3$).
- максимальні разові концентрації загального пилу досягали 1,2 ГДК.

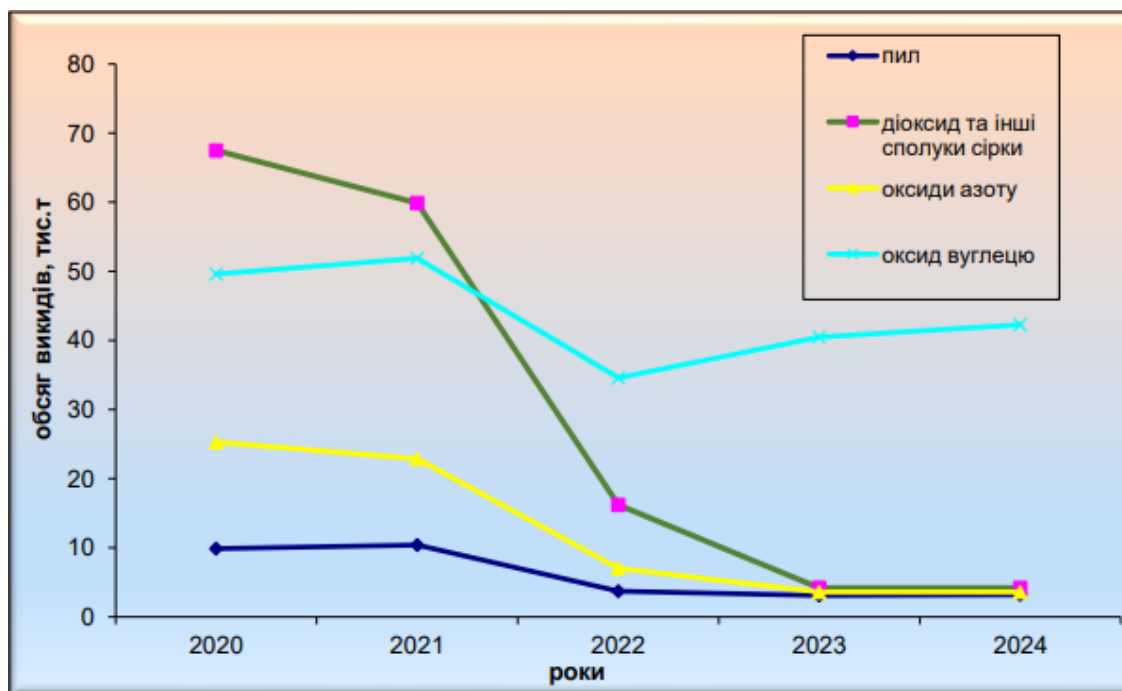


Рисунок 3.4 – Ретроспективна оцінка динаміки емісії пріоритетних забруднюючих речовин від стаціонарних джерел

Ретроспективний аналіз показників викидів у період 2020–2024 років свідчить про суттєве зменшення антропогенного навантаження на атмосферне повітря Запорізького індустріального вузла. Найбільш різке зниження спостерігається за показником діоксиду сірки та інших сірковмісних сполук – з понад 70 тис. т у 2020 році до менш ніж 2 тис. т після 2022 року. Аналогічну тенденцію демонструє і група оксидів азоту – зниження з понад 30 тис. т до рівня нижче 5 тис. т. Це може свідчити про зниження обсягів спалювання палива в енергетичних і металургійних установках.

Викиди пилу залишалися на стабільно низькому рівні у 2020–2024 роках (близько 8–10 тис. т), що може бути наслідком використання пилогазоочисного обладнання. Найменш виражене зменшення фіксується для оксиду вуглецю –

з 60 тис. т у 2020 до близько 35 тис. т у 2022 році, із подальшим незначним зростанням до 2024 року, що вказує на сталі джерела емісії, пов'язані з неповним згорянням палива.

Для верифікації впливу підприємства доцільно використовувати метод перехресного аналізу даних державних постів спостереження та мережі громадського моніторингу Есо Сіті, яка активно розвивається у Запоріжжі (станом на 2023 рік встановлено 39 станцій).

Таблиця 3.3 – Порівняльний аналіз концентрацій основних маркерів забруднення (за даними Звіту про CEO) [12]

Показник	Дані Есо Сіті (середньорічні, 2021/2022)	Гігієнічні регламенти / Рекомендації ВООЗ	Оцінка ситуації
PM ₁₀	34,98 / 24,53 мкг/м ³	15 мкг/м ³ (ВООЗ, річна)	Перевищення рекомендованих рівнів, що корелює з викидами ливарних цехів (SiO ₂).
PM _{2.5}	20,92 / 13,50 мкг/м ³	5 мкг/м ³ (ВООЗ, річна)	Суттєве перевищення. Індикатор наявності дрібнодисперсних металевих аерозолів.
NO ₂	0,047 / 0,031 мг/м ³	0,04 мг/м ³ (середньодобова, Україна)	Концентрації наближені до граничних або перевищують їх у періоди НМУ.
Формальдегід	19,0 / 11,0 мкг/м ³	3 мкг/м ³ (ГДК с.д.)	Критичне перевищення, що підтверджує значний внесок органічних викидів промисловості.

Таким чином, дані незалежного моніторингу Есо Сіті підтверджують офіційну статистику Гідромету щодо перевищень по пилу та формальдегіду. Зниження концентрацій у 2022 році (табл. 3.3) корелює зі спадом промислового виробництва (на 31,4% зменшення валових викидів по місту)

через військові дії, що є непрямим доказом домінуючої ролі промисловості, зокрема й ТОВ «ЗЛМЗ», у формуванні якості повітря.

Хоча локальний моніторинг дає точкові дані, для комплексної оцінки шлейфів забруднення (зокрема NO₂ та аерозолів) рекомендується використання даних супутникової системи Copernicus Sentinel-5P.

3.2 Дослідження гідроекологічного стану та ефективності систем водовідведення

В умовах техногенного навантаження Запорізького промислового вузла, де водний фактор є критичним ресурсом для металургійного виробництва, аналіз гідроекологічних аспектів діяльності ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» набуває особливої актуальності. Водне господарство підприємства функціонує в складних умовах, зумовлених як технологічними потребами, так і зовнішніми кризовими чинниками, зокрема наслідками руйнування Каховської ГЕС.

Дослідженням встановлено, що ТОВ «ЗЛМЗ» використовує водні ресурси для забезпечення технологічних процесів (охолодження індукційних печей, вагранок, термообробка, приготування формувальних сумішей, промивка деталей) та господарсько-питних потреб.

Аналіз регіональних даних свідчить про загальну тенденцію до зниження забору свіжої води у м. Запоріжжя: з **196,7 млн м³** у 2018 році до **153,8 млн м³** у 2022 році. Ця динаміка корелює з виробничими показниками підприємства, де зменшення обсягів виробництва в умовах воєнного стану призвело до скорочення водоспоживання.

Ключовим елементом екологічної стратегії підприємства є функціонування **7 оборотних циклів водопостачання** (два загальнозаводських та п'ять локальних) на Запорізькому майданчику. Використання оборотних циклів дозволяє мінімізувати забір свіжої води, використовуючи її переважно для підживлення систем (компенсація безповоротних втрат на випаровування та продувку).

Вода в оборотних циклах використовується для охолодження обладнання (індуктори, кесони печей), що відповідає принципам найкращих доступних технологій для ливарного виробництва.

Стічні води підприємства поділяються на виробничі (нормативно-чисті та забруднені), побутові та зливові. Скид зворотних вод здійснюється у каналізаційну мережу проммайданчика з подальшим транспортуванням на очисні споруди.

На основі аналізу технологічного регламенту ідентифіковано пріоритетні поллютанти у стічних водах:

- завислі речовини утворюються при мокрій очистці газів, гідрозмиві та регенерації піску. Типові концентрації у неочищених стоках можуть сягати 100–300 мг/л;

- нафтопродукти та емульсії, зокрема механічна обробка з використанням мастильно-охолоджувальних рідин генерує стічні води, що містять емульговані масла. Відпрацьовані емульсії (наприклад, емульсол, що містить 2% мінерального масла, 0,2% соди кальцинованої, 0,2% нітриту натрію) є критичним аспектом, оскільки навіть незначний вміст масел (10–15 мг/л) ускладнює роботу біологічних очисних споруд.

- у стоках ливарного виробництва можуть бути присутні іони заліза (Fe), марганцю (Mn), цинку (Zn), що надходять зі шламів газоочистки.

Діяльність ТОВ «ЗЛМЗ» слід розглядати в контексті загального стану водного басейну річки Дніпра. За даними ДУ «Запорізький ОЦКПХ МОЗ» за 2022 рік, 75% проб води з р. Дніпро не відповідали гігієнічним нормативам за санітарно-хімічними показниками (для порівняння, у 2021 році цей показник складав 26,6%). Це свідчить про критичне зниження асиміляційної здатності річки та необхідність суворого контролю за локальними очисними спорудами підприємства (відстійники, маслоуловлювачі) перед скидом у загальну мережу.

Загальний скид забруднюючих речовин у водні об'єкти Запоріжжя у 2022 році зменшився до **17,84 тис. т/рік** (проти 23,61 тис. т у 2021 р.), що

корелює зі спадом виробництва, але якісний склад води у р. Дніпро значно погіршився (75% проб з відхиленнями), що вимагає від підприємства суворого дотримання нормативів ГДС.

Руйнування греблі Каховської ГЕС (06.06.2023) стало фактором критичного техногенного ризику, що змінило гідрологічний режим регіону та створило загрозу зупинки водозаборів. У відповідь на це ТОВ «ЗЛМЗ» реалізує стратегію диверсифікації джерел водопостачання для забезпечення виробничої безпеки.

Проект використання підземних вод: Згідно з повідомленням про плановану діяльність проекту використання підземних вод (реєстраційний номер справи 11270), підприємство впроваджує проект експлуатації 7 артезіанських свердловин.

Глибина свердловин становить 96–130 м, загальна проектна потужність водозабору – 1008 м³/добу (альтернативний варіант – 806 м³/добу).

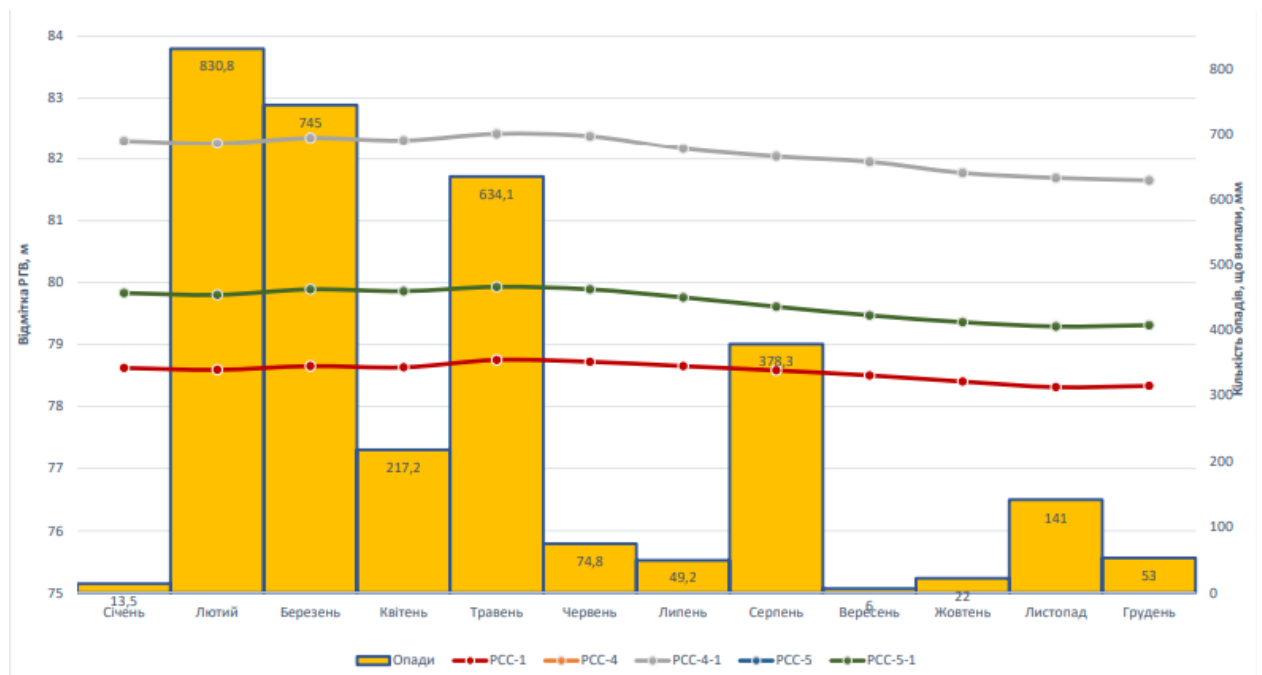


Рисунок 3.5 – Динаміка рівневого режиму підземних вод за даними мережі режимно-спостережних свердловин (РСС-1, РСС-4, РСС-4-1, РСС-5, РСС-5-1)

Передбачено цілодобовий режим роботи для наповнення накопичувальних резервуарів (два резервуари по 200 м³), що забезпечує автономність виробничих та протипожежних потреб в умовах нестабільного

централізованого постачання.

Для доведення якості підземної води до нормативних вимог передбачено використання установок зворотного осмосу. Цей процес створює новий екологічний аспект – утворення високомінералізованого концентрату (розсолів). Скидання таких стоків без належної обробки може призвести до вторинного засолення ґрунтів або порушення біоценозу у місці скиду, що вимагає розробки регламенту поводження з рідкими відходами водопідготовки.

Таблиця 3.4 – Основні джерела забруднення вод на ЗЛМЗ

Джерело забруднення	Основні забруднюючі речовини	Типові концентрації	Обсяги скидання
Мокра вибивка пилю	Завислі речовини, SiO ₂ , Fe, Mn, Zn, органічні в'язки	100–300 мг/л завислих речовин; Fe 50–100 мг/л	20–40 м³/хв на максимальному навантаженні
Охолодження обладнання	Мінеральні масла, теплота	<10 мг/л масел (закритий цикл)	50–100 м³/хв (закритий цикл)
Регенерація піску	Завислі речовини, розчинні органічні залишки	50–150 мг/л	5–10 м³/хв
Побутові стічні води	БПК ₅ , ХСК, завислі речовини, азот, фосфор	200–500 мг/л БПК ₅	2–3 м³/хв
Промивка верстатів та обладнання	Мастила, метали, органічні залишки	20–50 мг/л	Періодично

Попри декларування замкнутих циклів охолодження, наявність скидів (через продувку систем) та втрат на випаровування вимагає постійного підживлення системи. В умовах дефіциту водних ресурсів після руйнування Каховського водосховища, критичним стає питання ефективності локальних очисних споруд (відстійників, сепараторів) для повторного використання води, оскільки розбавлення стоків свіжою водою стає економічно та екологічно неможливим.

Технічна вода надходить з централізованої системи міста Запоріжжя; частина повертається як стічна вода у систему каналізації комбінату з попередньою первинною очисткою (відстійники, сепаратори).

3.3 Морфологічний аналіз та стратегія управління виробничими відходами

Виробнича діяльність ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод», що поєднує ливарні, термічні та механообробні процеси, супроводжується утворенням значних обсягів промислових відходів різних класів небезпеки. Управління цими потоками є критичним елементом екологічної безпеки підприємства, оскільки порушення правил поводження з відходами призводить до забруднення ґрунтів та підземних вод токсичними фільтратами [24-26].

Хоча прямий скид забруднюючих речовин у ґрунт технологічно не передбачений, забруднення відбувається за рахунок двох механізмів:

1. атмосферна депозиція: важкі метали (свинець, цинк, марганець), що викидаються з пилом, осідають на прилеглих територіях, формуючи техногенні геохімічні аномалії у ґрунтовому покриві.

2. накопичення промислових відходів. Діяльність заводу генерує значні обсяги відходів (відпрацьована формувальна суміш, шлаки, шлам газоочистки).

На основі аналізу технологічного регламенту та матеріально-сировинного балансу підприємства ідентифіковано основні групи відходів, які формують профіль техногенного навантаження на літосферу:

1. *відходи ливарного виробництва* (домінуюча група). Ця група складає основну масу твердих відходів підприємства.

– Відпрацьована формувальна суміш утворюється після вибивки литва. Морфологічно складається з кварцового піску, глини (бентоніту) та залишків вигорілих органічних зв'язуючих (фенольних смол). Цей відхід належить до III–IV класу небезпеки, але через наявність продуктів термічної деструкції органіки потребує спеціальних умов регенерації або захоронення.

– Металургійні шлаки утворюються в процесі плавки металу в індукційних печах та вагранках. Хімічний склад шлаків включає оксиди кремнію (33–40%), кальцію (30–50%), алюмінію та магнію. Шлаки є цінним вторинним ресурсом для будівельної галузі (виробництво щебеню, пемзи).

2. *Пилові відходи газоочистки.* В результаті роботи аспіраційних систем (рукавних фільтрів, циклонів) на дільницях вибивки, очищення литва та сушіння піску вловлюється дрібнодисперсний пил. Склад пилу: містить оксиди заліза (~50%), діоксид кремнію (~10%) та домішки важких металів (марганець, свинець, цинк), які адсорбуються на поверхні часток. Цей пил є токсичним і потребує грануляції або капсулювання перед утилізацією для запобігання вторинному пилінню.

3. *Відходи механічної обробки та хімічні відходи* характеризується меншими обсягами, але вищим класом небезпеки (II–III клас).

– Відпрацьовані мастильно-охолоджувальні рідини утворюються при токарній та фрезерній обробці. Містять емульговані нафтопродукти (мінеральні масла), нітрит натрію та кальциновану соду. Це високотоксичні рідкі відходи, скид яких у каналізацію або ґрунт суворо заборонений.

– Металева стружка, зокрема відходи легованих сталей та чавуну, які повністю повертаються у виробничий цикл як шихтовий матеріал (рециклінг).

Згідно з даними екологічного моніторингу та звітності підприємства, баланс утворення основних видів відходів характеризується показниками, наведеними у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Класифікація та обсяги відходів на металообробному підприємстві

Тип відходу	Обсяг (т)	Клас небезпеки	Подальше використання/утилізація
Піскові маси (регенеровані)	200–350	III (малотоксичні)	Повернення в формовку; 80–90% переробки
Пилоподібні відходи	15–30	II-III	Контейнеризація, передача на утилізацію або захоронення
Металовмісні шлаки	50–80	III (малотоксичні)	Продажу для переробки металургійним заводам
Зношені абразивні матеріали	5–10	III (малотоксичні)	Використання у виробництві будівельних матеріалів або захоронення
Забруднені охолоджуючі рідини	10–15	II (небезпечні)	Передача спеціалізованим організаціям для утилізації
Забруднені лакофарбні матеріали	1–3	II (небезпечні)	Утилізація на ЛОС
Стічні води	100,000–120,000 м ³	Змішані	Первинна очистка, потім скидна у каналізацію

Структура відходів (табл. 3.5) свідчить про високий потенціал до циркулярної економіки: до 90% формувальних сумішей та металовмісних шлаків можуть бути повернуті у виробництво або використані у суміжних галузях (будівництво). Однак, відходи II класу небезпеки (МОР, шлами гальваніки/фарбування) хоч і становлять меншу частку за масою, створюють найбільше екотоксикологічне навантаження на довкілля у разі порушення правил зберігання.

Таким чином, комплексний аналіз показує, що ТОВ «ЗЛМЗ» чинить мультифакторний вплив на довкілля. Пріоритетним завданням є не лише модернізація газоочистки (що вже триває), а й впровадження технологій регенерації піску та безпечної утилізації рідких відходів для захисту ґрунтів

та водних об'єктів.

Підприємство реалізує стратегію замкнутого циклу для металевих відходів (стружка, літники), повертаючи їх у плавку. Для формувальних пісків впроваджуються системи регенерації, що дозволяє відновити до **90%** матеріалу для повторного використання, суттєво знижуючи обсяги вивезення відходів на полігони.

Критичним аспектом залишається поводження з відходами II класу небезпеки (відпрацьовані емульсії, шлами від мийки деталей). Згідно з даними інвентаризації, ці відходи містять нафтопродукти та нітрит натрію. Стратегія підприємства передбачає їх тимчасове зберігання у герметичних ємностях з подальшою передачею ліцензованим підрядникам, що мінімізує ризик потрапляння токсикантів у ґрунтові води.

3.4 Аналіз стратегічних екологічних ризиків та адаптаційного потенціалу ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» в умовах воєнного стану

Проведений аналіз «Звіту про стратегічну екологічну оцінку Програми охорони довкілля м. Запоріжжя» та оперативної виробничої звітності дозволив ідентифікувати три групи критичних загроз, що вимагають впровадження адаптивних механізмів управління екологічною безпекою.

1. Дестабілізація водного балансу та загроза зупинки систем охолодження. Руйнування греблі Каховської ГЕС (06.06.2023) стало фактором критичного впливу на екосистему регіону, спричинивши незворотні зміни гідрологічного режиму р. Дніпро та зниження рівня води у водозаборах. Для ТОВ «ЗЛМЗ», де вода використовується в оборотних циклах для охолодження високотемпературного обладнання (індукційних печей, вагранок), це створює пряму загрозу аварійної зупинки.

Відповіддю підприємства на ризики централізованого водопостачання є перехід на використання підземних вод. Зокрема, на промисловому

майданчику (філія у м. Кривий Ріг) реалізується проєкт експлуатації 7 артезіанських свердловин глибиною 96–130 м [16]. Загальна потужність водозабору складає **1008 м³/добу**, що дозволяє створити стратегічний резерв води для виробничих та санітарних потреб незалежно від стану поверхневих джерел.

Впровадження системи очищення підземних вод методом зворотного осмосу створило новий екологічний аспект – поводження з високомінералізованим концентратом (розсолем). Скидання таких відходів у ґрунт або загальну каналізаційну мережу без попередньої обробки створює ризик вторинного засолення земель та порушення біоценозу очисних споруд, що вимагає розробки окремого регламенту утилізації рідких відходів.

2. Енергетична безпека та ризик неконтрольованих емісій.

Порушення енергопостачання внаслідок ракетних обстрілів енергетичної інфраструктури створює специфічний екологічний ризик для ливарного виробництва.

При раптовому знеструмленні підприємства відбувається зупинка тягодуттєвого обладнання та аспіраційних установок (рукавних фільтрів, скрубєрів). При цьому розплавлений метал у печах та ковшах має високу теплову інерцію і продовжує виділяти продукти горіння, пил та гази. За відсутності примусової тяги відбувається «залповий» викид неочищених газів (CO, NO_x, пил) безпосередньо у робочу зону та через аераційні ліхтарі в атмосферу, що кваліфікується як неорганізована емісія. Статистика 2022 року вже демонструє вплив перебоїв з електропостачанням на загальну динаміку промислових викидів у регіоні.

Такі неорганізовані емісії не фіксуються при штатному інструментальному контролі, проте суттєво впливають на пікові концентрації забруднювачів у селітебній зоні, що підтверджується даними громадського моніторингу Eco City у періоди блекаутів.

Таблиця 3.6 – Структурно-хімічна характеристика забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферу ТОВ «ЗЛМЗ»

Група речовин	Перелік специфічних інгредієнтів	Основні джерела утворення
Тверді частки (аерозолі)	Пил недиференційований за складом, кремнію діоксид аморфний, залізо та його сполуки, алюмінію оксид	Вибивка литва, зачищення виливниць, транспортування сипучих (пісок, глина), зварювальні пости
Важкі метали та їх сполуки	Манган (Mn), мідь (Cu), нікель (Ni), цинк (Zn), свинець (Pb), хром (Cr+6), олово (Sn), ванадій (V ₂ O ₅)	Плавильні печі (легування сталей), зварювальні аерозолі, кольорове литво (бронза)
Газоподібні неорганічні сполуки	Оксиди азоту (NO _x), оксид вуглецю (CO), діоксид сірки (SO ₂), фтористий водень (HF), хлористий водень (HCl)	Сушильні барабани (горіння палива), термообробка, процеси травлення /флюсування
Органічні сполуки та канцерогени	Фенол, формальдегід, бенз(а)пірен, толуол, ксилол, бензол, стирол, мінеральні масла, вуглеводні C ₁₂ -C ₁₉	Термічна деструкція зв'язуючих у формувальних сумішах, вигорання мастил, фарбувальні дільниці
Парникові гази	Діоксид вуглецю (CO ₂), метан (CH ₄), оксид азоту (I) (N ₂ O),	Спалювання природного газу, технологічні процеси плавки

Аналіз номенклатури викидів (табл. 3.6) свідчить, що попри помірний валовий обсяг, спектр забруднювачів (48 найменувань) є типовим для металургійного переділу високої складності. Критичним екологічним аспектом є наявність канцерогенів (хром шестивалентний, нікель, бенз(а)пірен) та речовин гостроспрямованої дії (фториди, фенол), що вимагає суворого контролю ефективності газоочисного обладнання не лише по пилу, а й по газовій фазі.

3. Кумулятивний вплив на здоров'я населення (аерогенний ризик).

В умовах війни зростає вразливість імунної системи населення до аерогенного впливу, зокрема дрібнодисперсного пилу (PM_{2.5}, PM₁₀). Згідно

з даними ВООЗ та результатами моніторингу ДУ «Запорізький ОЦКПХ МОЗ», ситуація з якістю повітря залишається критичною:

- у 2022 році в Запоріжжі зафіксовано перевищення безпечних концентрацій по дрібнодисперсному пилу PM_{2.5} протягом 72 діб (діапазон 16,0–181 мкг/м³) та PM₁₀ протягом 18 діб;
- ТОВ «ЗЛМЗ», як джерело викидів пилу, фенолу (9,8 т/рік), діоксиду азоту (3171,9 т/рік сумарно по промвузлу) та формальдегіду, робить свій внесок у формування інгалаційного ризику;
- це корелює зі зростанням рівня захворюваності населення: у місті фіксуються високі показники смертності від хвороб системи кровообігу та органів дихання, які є маркерами забруднення повітря.

Таблиця 3.7 – Матриця SWOT-аналізу екологічного потенціалу ТОВ «ЗЛМЗ»

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
1. Реалізація проєктів модернізації аспірації (сушильні барабани, зачистні верстати). 2. Створена автономна система водозабезпечення (свердловини). 3. Високий рівень рециклінгу металевих відходів у власному виробництві.	1. Використання технологій лиття, що генерують фенол та формальдегід. 2. Залежність ефективності газоочистки від стабільності електропостачання. 3. Наявність джерел неорганізованих викидів пилу при транспортуванні сипучих.
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
1. Впровадження систем регенерації формувальних пісків (зниження відходів). 2. Перехід на неорганічні зв'язуючі системи (зниження органічних викидів).	1. Посилення дефіциту водних ресурсів у регіоні. 2. Зростання аварійності через енергетичні кризи. 3. Посилення вимог до санітарно-захисних зон в умовах наближення житлової забудови.

Реалізація "нульового сценарію" (відмова від модернізації газоочистки та водопостачання) в умовах воєнного стану є неприпустимою, оскільки це

приведе до погіршення санітарно-епідеміологічного благополуччя населення. Пріоритетом має стати забезпечення автономності ресурсів (свердловини) та встановлення систем аварійного живлення для газоочисного обладнання.

3.5 Інтегральна оцінка стану атмосферного повітря в урбанізованій агломерації Запоріжжя в контексті впливу діяльності ТОВ «ЗЛМЗ»

Місто Запоріжжя історично належить до регіонів України з високим рівнем забруднення повітря, що зумовлено концентрацією металургійних, хімічних та енергетичних підприємств. За даними обласного департаменту екології, в повітрі міста стабільно фіксуються підвищені концентрації ряду шкідливих речовин. Основний внесок у комплексний індекс забруднення атмосфери Запоріжжя роблять такі інгредієнти, як пил (суспендовані частинки), оксид вуглецю, оксиди азоту, діоксид сірки, фенол і формальдегід. Середньорічно близько 8% проб атмосферного повітря в місті перевищують ГДК по тому чи іншому забруднювачу. Максимально-разові перевищення нормативів реєструються переважно в промислових районах міста.

Наприклад, моніторинг повітря у Заводському районі (поблизу проммайданчиків) 18 серпня 2025 р. виявив концентрації сірководню $0,0143 \text{ мг/м}^3$ (у 1,79 раза вище ГДК), формальдегіду $0,051 \text{ мг/м}^3$ (в 1,46 раза вище ГДК) та фенолу $0,017 \text{ мг/м}^3$ (в 1,7 раза вище ГДК) [12-13, 16]. Подібні речовини можуть утворюватися при виплавці та ливарних процесах (фенол, формальдегід – з випаровуванням сполук формувальних сумішей; сірководень – при використанні коксу або внаслідок роботи коксових та хімічних виробництв тощо) і їх присутність у житлових зонах свідчить про розповсюдження викидів від промислових джерел.

Загалом якість повітря в м. Запоріжжя за класифікацією залишається на високому рівні забруднення: розрахунковий комплексний індекс забруднення атмосфери (ІЗА) на постах спостереження в центральній частині міста

досягав значень 5,9–10,1 (за 2020–2021 рр.), що відповідає високому рівню забруднення.

Військові дії 2022–2023 рр. дещо вплинули на зменшення промислових викидів через зупинку окремих виробництв, що відобразилося у тимчасовому покращенні показників якості повітря. Втім із відновленням діяльності підприємств проблема забруднення повітря залишається актуальною.



Рисунок 3.6 – Динаміка комплексного індексу атмосферного забруднення в Україні за перше півріччя 2023–2025 років [28]

За результатами аналізу стану атмосферного повітря в Україні за перше півріччя 2025 року, проведеного Геофізичною обсерваторією імені Бориса Срезневського у співпраці з громадською ініціативою SaveDnipro, зафіксовано критичні рівні забруднення в низці урбанізованих територій.

Усі населені пункти, що увійшли до десятки антилідерів, мають ІЗА $> 7,0$, що кваліфікується як високий рівень забруднення повітря з потенційною загрозою для населення. Згідно з рейтингом, місто Запоріжжя (Запорізька область) посіло сьоме місце серед найбільш забруднених міст країни (рис. 3.6).

З огляду на те, що ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод»

функціонує в межах одного з найбільш техногенно навантажених регіонів України – м. Запоріжжя, оцінка його внеску в загальну структуру забруднення атмосферного повітря є критично важливою. Основними факторами, що зумовлюють підвищений рівень ІЗА в промислових зонах міста, зокрема в Заводському районі, залишаються ливарні та металообробні процеси, характерні для ТОВ «ЗЛМЗ». Викиди пилу, оксидів азоту, фенолу, формальдегіду та сірководню мають безпосередній зв'язок з технологічними операціями підприємства, що підтверджується просторовою кореляцією перевищень нормативів у районі його розміщення.

Така ситуація обґрунтовує необхідність модернізації виробничих ліній з упровадженням маловідходних технологій, систем фільтрації ультрадисперсних частинок, переходу на менш токсичні формувальні суміші та цифрових систем контролю викидів. Упровадження принципів «cleaner production» та BAT (інноваційних технологій), зокрема відповідно до Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди [4], дасть змогу знизити вуглецеву та токсичну інтенсивність виробництва, зменшити негативний вплив на здоров'я населення та покращити інтегральні індекси якості повітря в зоні впливу підприємства.

3.6 Обґрунтування комплексної системи мітигації техногенного впливу ТОВ «ЗЛМЗ» на шляху до кліматичної нейтральності

На основі результатів оцінки техногенного навантаження ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод», де ідентифіковано перевищення гігієнічних нормативів по фенолу (1,7 ГДК), формальдегіду (1,7 ГДК) та дрібнодисперсному пилу, розроблено комплексну програму екологічної модернізації. Запропоновані заходи спрямовані на досягнення нормативів Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди [4].

Проаналізовано, що для металообробного підприємства в умовах 2025 року критичними є три вектори модернізації:

1. технологічне переоснащення ливарного переділу для елімінації викидів фенолу та формальдегіду;
2. циркулярне управління багатотоннажними шлаковими відходами (64% від загальної маси);
3. кліматична адаптація через декарбонізацію енергоємних процесів.

Враховуючи, що ливарне виробництво є джерелом викидів поліметалічного пилу та канцерогенів (хром VI, нікель, свинець), пропонується перехід від застарілих інерційних пиловловлювачів до високоефективних рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією.

Встановлення рукавних фільтрів типу фільтр рукавний з імпульсною регенерацією на дільницях вибивки та переробки сумішей.

Згідно з даними досліджень, рукавні фільтри забезпечують зниження вихідної запиленості до 10–20 мг/м³, що відповідає європейським стандартам, тоді як ефективність циклонів обмежена (залишкова запиленість до 1000 мг/м³).

Зниження викидів дрібнодисперсних фракцій PM2.5 та PM10 на 98–99%. Це критично важливо, оскільки у м. Запоріжжя фіксуються перевищення по PM2.5 протягом 72 діб на рік.

Основним джерелом викидів фенолу та формальдегіду є термічна деструкція органічних зв'язуючих матеріалів (фенолформальдегідних смол) при контакті з розплавленим металом ($t = 1600^{\circ}\text{C}$).

Поетапний перехід на Cold-box-amin процес або використання неорганічних зв'язуючих (рідке скло) з продувкою вуглекислим газом для виробництва стрижнів.

Використання неорганічних зв'язуючих дозволяє повністю виключити утворення ароматичних вуглеводнів, фенолу та бенз(а)пірену (канцероген 1-го класу).

Впровадження каталітичних допалювачів або адсорбційних фільтрів (на активованому вугіллі) на існуючих лініях, що дозволить знизити концентрацію органічних сполук у викидах до рівня $< 20 \text{ мг/м}^3$.

Оскільки підприємство генерує 6,6 тис. т/рік парникових газів та має викиди оксидів азоту від спалювання природного газу, пропонується:

- впровадження рекуператорів тепла на термічних печах. Використання тепла відхідних газів для підігріву дуттєвого повітря дозволить зекономити 10–15% палива;

- застосування пальників з низьким виходом (Low-NO_x burners) та технології двостадійного спалювання палива. Це дозволить знизити температуру в ядрі факела і зменшити утворення термічних оксидів азоту на 30–50%.

У зв'язку з руйнуванням Каховської ГЕС та переходом ТОВ «ЗЛМЗ» на використання підземних вод (потужність водозабору 1008 м³/добу зі свердловин глибиною 96–130 м), виникає проблема утилізації розсолів (концентрату) після установок зворотного осмосу.

Пропонується модернізація існуючих 7 оборотних циклів з впровадженням локальних очисних установок для знешкодження специфічних забруднювачів перед поверненням води у цикл.

Для очищення стічних вод від емульсолу та нафтопродуктів (від механічного цеху) рекомендується застосування електрофлотаційних модулів. Електролітичне виділення бульбашок газу, які флотують емульговані масла та завислі речовини на поверхню. Зниження вмісту нафтопродуктів на 70–90%, завислих речовин – на 95–99%. Отриманий шлам має меншу вологість (94–96%), що спрощує його утилізацію.

Скидання високомінералізованого концентрату (розсолу) у каналізацію або ґрунт є екологічно небезпечним. Використання вакуум-випарних установок (кристалізаторів) для переробки концентрату.

Отримання технічної дистильованої води (повертається у виробництво) та сухого сольового залишку, який підлягає захороненню на полігоні як твердий відхід IV класу небезпеки. Це забезпечить реалізацію безстічної технології водокористування.

Щорічно підприємство утворює 200–350 тонн піскових мас, які частково вивозяться на полігон. ВФС містить 90–95% кварцового піску, який є цінним ресурсом. Впровадження установки механічної або термічної регенерації піску.

Відтирання плівки зв'язуючого з зерен піску. Дозволяє повернути у цикл до 70–80% піску.

Скорочення обсягів вивезення відходів на полігони, зменшення потреби у видобутку свіжого кар'єрного піску, зниження витрат на логістику.

Шлаки (50–80 т/рік) після дроблення та магнітної сепарації (для вилучення скрапу) доцільно використовувати як вторинний щебінь у дорожньому будівництві або як компонент для виробництва шлакоблоків, що відповідає принципам циркулярної економіки.

Згідно з вимогами Постанови КМУ № 827, необхідно встановити автоматизовані системи моніторингу викидів (CEMS) на основних джерелах (димові труби печей, сушарок) для контролю параметрів: пил, у режимі реального часу [29, 38].

2. Захист від «залпових» викидів, зокрема встановлення джерел безперебійного живлення (дизель-генераторів) для роботи димососів та аспіраційних систем у разі аварійних відключень електроенергії, щоб уникнути неконтрольованих викидів у робочу зону та атмосферу при працюючих печах.

Таблиця 3.8 – Зведена оцінка ефективності запропонованих заходів

Напрямок	Захід	Очікуваний екологічний ефект	Відповідність стандартам
Атмосфера	Встановлення рукавних фільтрів ФРІР	Зниження викидів пилу до $< 20 \text{ мг/м}^3$	Директива 2010/75/ЄС (НДТМ)
Атмосфера	Заміна органічних зв'язуючих	Зменшення емісії фенолу та формальдегіду	Наказ МОЗ № 813
Вода	Електрофлотація стічних вод	Видалення нафтопродуктів на 90%	Водна рамкова директива ЄС
Відходи	Регенерація формульовального піску	Повернення у виробництво до 80% матеріалу	Стратегія управління відходами

Реалізація запропонованих заходів дозволить ТОВ «ЗЛМЗ» трансформуватися у екологічно безпечне підприємство, зменшити валові викиди пріоритетних забруднювачів та мінімізувати ризики для здоров'я населення Запоріжжя в умовах післявоєнного відновлення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

4.1 Охорона праці та управління професійними ризиками на металообробному підприємстві

Охорона праці на металообробному підприємстві є складовою системи виробничої безпеки та спрямована на збереження життя, здоров'я і працездатності працівників у процесі трудової діяльності [1]. Особливості технологічних процесів металообробки (лиття, механічна обробка, термічна обробка, зварювання, різання, використання хімічних реагентів і енергоємного обладнання) формують підвищений рівень професійних ризиків.

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами на підприємстві є:

- підвищений рівень шуму і вібрації;
- пил і аерозолі металів;
- токсичні гази та пари (оксиди азоту, чадний газ, леткі органічні сполуки);
- підвищені температури та теплове випромінювання;
- електричний струм;
- рухомі частини механізмів і верстатів.

Управління охороною праці здійснюється на основі вимог Закону України «Про охорону праці», ДСТУ ISO 45001:2019 та галузевих нормативно-правових актів. На підприємстві повинна функціонувати система управління охороною праці, яка передбачає:

- ідентифікацію небезпек і оцінювання професійних ризиків;
- розроблення та впровадження профілактичних заходів;
- проведення інструктажів і навчання персоналу;
- забезпечення працівників засобами індивідуального захисту;
- контроль стану виробничого середовища.

Особлива увага приділяється профілактиці професійних захворювань,

зниженню рівнів шуму й запиленості, впровадженню локальної вентиляції та автоматизації небезпечних операцій.

4.2 Комплексний підхід до захисту працівників і виробничих об'єктів

Комплексний підхід до захисту на металообробному підприємстві передбачає інтеграцію організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та управлінських заходів, спрямованих на зниження ризику виробничого травматизму та професійних захворювань і забезпечення безпеки діяльності у всіх оперативних ланках. Такий підхід є обов'язковою складовою системи охорони праці та безпеки виробництва відповідно до сучасних міжнародних і національних стандартів і практик.

Сучасна система управління охороною праці базується на принципах системного менеджменту ризиків, що включає ідентифікацію небезпечних факторів, оцінювання ризиків, планування заходів з їх мінімізації, впровадження контролю за їх виконанням і постійне вдосконалення політики безпеки. Такий підхід інтегрований у міжнародний стандарт ISO 45001:2018, яка включає: політику, планування, реалізацію, оцінювання результатів і вдосконалення відповідно до циклу Plan-Do-Check-Act.

До основних елементів комплексного захисту належать:

- раціональне планування виробничих приміщень і зонування території;
- впровадження сучасних систем вентиляції, пилогазоочистки та шумозахисту;
- автоматизація та дистанційне керування небезпечними процесами;
- регулярне технічне обслуговування та контроль обладнання;
- створення безпечних умов зберігання небезпечних речовин і відходів.

Комплексний захист передбачає впровадження інженерно-технічних рішень, що мінімізують контакт працівників із джерелами небезпеки (наприклад, автоматизація операцій різання та термічної обробки, облаштування інформаційних знаків безпеки та світлосигнальних пристроїв),

що сприяє зниженню частоти виробничих травм і аварій.

В умовах воєнного стану додатковими загрозами є ризики пошкодження виробничих об'єктів, перебої в енергопостачанні та можливість виникнення вторинних аварій. Тому система захисту повинна включати резервні джерела живлення, аварійні плани зупинки виробництва та алгоритми дій персоналу у разі надзвичайних ситуацій.

4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

Металообробні підприємства можуть бути потенційними джерелами техногенних надзвичайних ситуацій, які здатні впливати не лише на персонал, а й на населення прилеглих територій. До можливих надзвичайних ситуацій належать аварійні викиди забруднювальних речовин, пожежі, вибухи, руйнування інженерних споруд, що створюють загрозу життю й здоров'ю людей, порушують функціонування життєво важливих систем і завдають шкоди довкіллю. В українському законодавстві захист населення і територій від таких ситуацій регулюється комплексом нормативно-правових актів, серед яких ключовими є Закон України «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» та Кодекс цивільного захисту України.

Захист населення в таких умовах здійснюється відповідно до Кодексу цивільного захисту України та включає:

- прогнозування можливих сценаріїв надзвичайних ситуацій;
- інформування населення про загрози та правила поведінки;
- розроблення планів евакуації та укриття;
- створення систем оповіщення та взаємодії з органами місцевої влади;
- організацію медичного й санітарного забезпечення.

Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій техногенного характеру передбачає послідовну реалізацію комплексу організаційних, інформаційних, інженерно-технічних та соціальних заходів. Основними

елементами такої системи є:

1) Оповіщення та інформування населення. Ефективна система оповіщення передбачає використання державних та локальних каналів зв'язку для доведення інформації про загрозу НС чи її настання. Це включає сигналізації, автоматизовані системи повідомлення, SMS-розсилки, медіа-повідомлення та інші засоби, що забезпечують негайне інформування населення про необхідність дій для збереження життя й здоров'я.

2) Планування евакуації та укриття. Планування евакуації передбачає визначення маршрутів, пунктів збору та безпечних зон, а також організацію транспортного забезпечення для переміщення населення з потенційно небезпечних зон до місць безпеки. Інженерні споруди цивільного захисту (укриття) повинні відповідати встановленим вимогам щодо захисту від хімічних, вибухових та інших небезпечних факторів. Організація укриттів і пунктів тимчасового перебування здійснюється відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України.

3) Захист критичної інфраструктури та забезпечення життєдіяльності. Це включає заходи щодо безперервного функціонування об'єктів життєзабезпечення (водопостачання, електропостачання, транспорт, медична допомога) у разі НС і забезпечення доступу до медичних, соціальних та гуманітарних ресурсів для постраждалого населення.

4) Психологічна та соціальна підтримка. Під час надзвичайних ситуацій суттєво зростають рівні стресу і психосоціального навантаження серед населення, що потребує організації психологічної підтримки, соціальних сервісів та забезпечення базових потреб (харчування, житло, медикаменти).

Для забезпечення ефективного захисту населення у разі можливих аварій або катастроф на підприємствах з підвищеною техногенною небезпекою рекомендуються наступні практичні заходи:

- розроблення та впровадження планів реагування на надзвичайні ситуації відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту та профільної постанови щодо класифікації НС;

- проведення навчань та тренувань для працівників і населення з відпрацювання дій під час евакуації та укриття;
- оцінювання систем оповіщення та інфраструктури укриттів, забезпечення їх відповідності нормативам;
- участь підприємств у місцевих комісіях з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій для узгодження дій у разі реальної загрози

В умовах воєнного стану особливого значення набуває інтеграція заходів цивільного захисту з екологічною безпекою, зокрема недопущення вторинного забруднення довкілля внаслідок пошкодження промислових об'єктів. Реалізація превентивних заходів та постійний моніторинг стану виробничих систем дозволяють знизити ризики для населення та підвищити загальний рівень екологічної й техногенної безпеки регіону.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано, що в умовах зростаючого антропогенного тиску та євроінтеграційних процесів українська металообробна промисловість потребує глибокої екологічної модернізації для відповідності вимогам Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди та механізму прикордонного вуглецевого коригування, повноцінне впровадження якого розпочнеться з 2026 року. Встановлено, що в Запорізькому регіоні, де металургійне виробництво формує 90,7% загального техногенного навантаження, ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод» ідентифіковано як об'єкт зі значним впливом, що в умовах воєнного стану стикається з подвійним викликом: необхідністю декарбонізації та забезпечення фізичної стійкості виробництва.

Досліджено, що виробнича діяльність ТОВ «ЗЛМЗ» супроводжується емісією 48 найменувань забруднюючих речовин, при цьому фактичні обсяги виробництва виливниць досягли 423 тис. т/рік, що перевищує проєктну потужність (360 тис. т/рік) і пропорційно збільшує емісійне навантаження. Виявлено, що попри помірний валовий викид забруднюючих речовин (~0,148 тис. т/рік без ПГ), підприємство формує специфічний токсикологічний профіль: середньорічні концентрації фенолу та формальдегіду в зоні впливу стабільно перевищують гігієнічні нормативи у 1,7 раза (1,7 ГДК), що пов'язано з термічною деструкцією органічних зв'язуючих у ливарному виробництві.

Вивчено, що руйнування Каховської ГЕС стало фактором критичного техногенного ризику, що змусило підприємство реалізувати проєкт переходу на підземні води: передбачено експлуатацію 7 артезіанських свердловин глибиною 96–130 м із загальною проєктною потужністю 1008 м³/добу. З'ясовано, що це створило новий екологічний виклик – необхідність утилізації високомінералізованих розсолів (концентрату) після установок зворотного осмосу, скидання яких без обробки загрожує вторинним засоленням ґрунтів.

З'ясовано, що структура промислових відходів підприємства характеризується домінуванням металургійних шлаків (64% від загального обсягу) та металобрухту (17%), що вказує на високий потенціал впровадження циркулярної економіки. Водночас відходи II класу небезпеки

(відпрацьовані мастильно-охолоджувальні рідини, емульсії), обсяг утворення яких становить 10–15 т/рік, створюють найвищий екотоксикологічний ризик через вміст нафтопродуктів та нітриту натрію і вимагають суворої ізоляції від компонентів довкілля.

Досліджено, що енергетична нестабільність в умовах воєнного стану є ключовим фактором ризику виникнення неконтрольованих «залпових» викидів. Раптове відключення аспіраційних систем при працюючих плавильних агрегатах, що мають високу теплову інерцію (t розплаву $\sim 1600^{\circ}\text{C}$), призводить до надходження неочищених газів (CO , NO_x , пил) безпосередньо у робочу зону та атмосферу, що не фіксується при штатному контролі, але впливає на пікові концентрації у місті.

Виявлено, що підприємство має виражений вуглецевий слід, генеруючи щорічно 6,6 тис. тонн парникових газів (CO_2 , CH_4 , N_2O) внаслідок енергоємних термічних процесів. Це супроводжується викидами оксидів азоту, концентрації яких у місті перевищують норму в 1,2 раза, що диктує необхідність заміни газопальникового обладнання на енергоефективне.

З'ясовано, що стан атмосферного повітря характеризується критичним забрудненням дрібнодисперсним пилом: перевищення нормативів ВООЗ по $\text{PM}_{2.5}$ фіксувалися протягом 72 діб на рік. Підтверджено, що ливарні процеси (вибивка, зачищення) є джерелом мінерального пилу з високим вмістом ($>70\%$) та металевих аерозолів (Mn , Pb , Cr), що формує високий інгалаційний ризик для населення.

8. Обґрунтовано комплекс заходів щодо впровадження екологічно чистих технологій, а саме: встановлення рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією (зниження пилу до $<20 \text{ мг/м}^3$), перехід на неорганічні зв'язуючі матеріали для повної елімінації викидів фенолу, впровадження електрофлотації для очищення стічних вод (ефективність видалення нафтопродуктів 90%) та регенерацію формувального піску з поверненням до 80–90% матеріалу у виробничий цикл. Реалізація цих пропозицій забезпечить відповідність принципам інноваційних технологій та перехід до кліматично нейтрального виробництва.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці : навч. посіб. 5-те вид. Київ : Каравела, 2021. 384 с.
2. Грес Л. П., Єрьомін О. О., Каракаш Є. О., Радченко Ю. М. Екологічні аспекти металургійних технологій (1 ч.): навч. посібник. Дніпро: Україна. держ. ун-т науки і технол., 2022. 106 с.
3. Державна служба статистики України. <https://www.ukrstat.gov.ua/>
4. Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди (IED): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>
5. Довідкові документи з НДТМ (BREF) для ливарного виробництва: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/smitheries-and-foundries-industry>
6. ДСанПіН 2.2.4-171-10: Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>
7. Єдиний реєстр з оцінки впливу на довкілля (Україна): <http://eia.menr.gov.ua/>
8. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992. Поточна редакція від 08.08.2025., № 3855-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
9. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 26.06.91. Поточна редакція від 08.08.2025, 3855-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
10. Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
11. Закон України «Про управління відходами» № 2849-IX від 13.12.2022. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
12. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Програми економічного і соціального розвитку Запорізької області на 2026 рік. Запоріжжя : Запорізька ОДА (ОВА), 2025. 93 с.

13. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Регіонального плану управління відходами Запорізької області до 2035 року : вебсайт. 2025. URL: <https://www.zoda.gov.ua/news/74672/>

14. Машков О.А., Іващенко Т.Г., Мухіна К.Є., Печений В.Л. Інтеграція аерокосмічних технологій в систему управління екологічною безпекою: оцінка ефективності застосування системи підтримки прийняття управлінських інформаційних екологічних рішень. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*, № 4, 2023, С. 20-27.

15. Методичні рекомендації. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря. Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 184 від 13.04.2007. URL: <http://surl.li/pjrks>

16. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічні паспорти за 2020-2024 рр. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichni-pasporty/>

17. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Інформація щодо стану якості атмосферного повітря в Україні (за даними Державної санітарно-епідеміологічної служби та інших джерел). 2024. URL: <https://mepr.gov.ua/>

18. ЗЛМЗ. (ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод») <https://zlmz.com.ua/>

19. Матухно О.В., Шматков Г.Г., Белоконь К.В., Сибір А.В. Дослідження екологічної безпеки металургійного виробництва методом оцінки життєвого циклу. Науково-практичний журнал. Екологічні науки № 2(29). Т. 1. 2020. С. 32-37. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.1.5>

20. Міста України з найбільш забрудненим повітрям у 2025 році. *Еко.Район*. 2025. 22 вересня. URL: <https://eco.rayon.in.ua/news/836553-mista-ukraini-z-naybilsh-zabrudnenim-povitryam-u-2025-rotsi>

21. Повідомлення про плановану діяльність, яка підлягає оцінці впливу на довкілля : ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод». [Запорізький ливарно мех. завод.pdf](#)

22. Про затвердження Програми охорони довкілля щодо поетапного зниження викидів забруднюючих речовин суб'єктами господарювання

м. Запоріжжя : рішення Запорізької міської ради. 2024. 292 с. URL: <https://storage.googleapis.com/svoi-upload/442/373159/43ccf4eb-d9e2-4c4e-bb5e-edafbbf34919.pdf>

23. Русакова Т.І. Посібник до вивчення дисципліни «Технології основних виробництв», частина І. Машинобудування та металургія: навч. посіб. Дніпро: Журфонд, 2021. 96 с.

24. Скуйбіда, О., Гаркуша, М. Поводження з металобрухтом та металевими відходами для переходу до циркулярної економіки та відновлення України. *Управління змінами та інновації*, (8), 2023. С. 77-82. <https://doi.org/10.32782/CMI/2023-8-13>

25. Техноекологія : підручник / Мальований М. С., Боголюбов В. М., Шаніна Т. П., Шмандій В. М., Сафранов Т. А.; за ред. М. С. Мальованого. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2013. 424 с.

26. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: Навч. посібник / А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко / За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. Київ: Видавничий дім «Вініченко», 2016. 224 с.

27. Топ-100 компаній України. Рейтинг компаній галузі «Металообробна промисловість» (підгалузь «Металообробка») за 2024 рік : вебсайт. URL: <https://top-1000.com.ua/ratings/year-2024/sector-40/sub-sector-274>

28. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/>

29. Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI). <http://www.aqicn.org/>

30. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

31. Copernicus Atmosphere Monitoring Service. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/>

32. Copernicus Sentinel-5P / TROPOMI. Tropospheric NO₂ and SO₂ data over Ukraine. 2024. Дані доступні через Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/>

33. Data on global air pollutant concentrations. Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS). 2024. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/>
34. Environmental Footprint Methods. Calculating the environmental impact of products and services. URL: https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/environmental-footprint-methods_en
35. He Y., Zhang J., Wang X., Li Y., Tian X. and Wang Y. (2022) A process scenario oriented Life Cycle Assessment framework for machining processes. *Procedia CIRP* 105, 332–338. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.05>
36. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Reports on GHG: <https://www.ipcc.ch/reports/>
37. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. URL: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
38. NASA Earth Observatory: (супутникові дані). URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/>
39. Monitoring air pollution from space. *European Space Agency*. Copernicus Sentinel-5P. 2024. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
40. SaveEcoBot. <https://www.saveecobot.com/maps>.
41. Savenets Mykhailo, Nadtochii Liudmyla, Kozlenko T. V. and others. Status of atmospheric air pollution in Ukraine prior to the full-scale russian invasion. Part 2: Pollutants total content according to the satellite data. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 2023. 32. P. 130-143. doi: [10.31481/uhmj.32.2023.09](https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.09)
42. Sustainability Indicators Report 2025. URL: <https://worldsteel.org/wider-sustainability/sustainability-indicators/>
43. UNEP (United Nations Environment Programme). URL: <https://www.unep.org/>
44. Water Framework Directive (2000/60/EC): Рамкова директива ЄС про водну політику, що визначає принципи басейнового управління та контролю забруднення. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en
45. WHO Global Air Quality Guidelines. World Health Organization (BOO3): <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
46. World Steel Association. <https://worldsteel.org/>