

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГИЖИЦЬКОГО
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 цементного виробництва на
атмосферу та прилеглі території і розробка заходів для зменшення
екологічних ризиків»**

Виконав: студент групи Еко-63
спеціальності 101 «Екологія»
ШОТ Леонід Артурович

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 студенту
Шот Леоніду Артуровичу

1. Тема роботи: «Екологічна оцінка впливу цементного виробництва на атмосферу та прилеглі території і розробка заходів для зменшення екологічних ризиків»

Затверджена наказом по університету № 906/к-с від 31 грудня 2024 р.

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 Глобальні виклики цементної індустрії: декарбонізація та European Green Deal

- 1.2 Ідентифікація полютантів та їх вплив на біоту і клімат

- 1.3 Логістика як приховане джерело забруднення в умовах воєнного стану

- 1.4 Найкращі доступні технології як «еталон» екологізації цементної промисловості

- 2 Об'єкт, умови та методика досліджень

- 2.1 Характеристика об'єкта дослідження ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

- 2.2 Природно-кліматична характеристика зони впливу підприємства

- 2.3 Методика дослідження екологічних ризиків в умовах гармонізації регуляторних вимог України

- 3 Результати дослідження

- 3.1 Аналіз і системна інвентаризація джерел викидів як основа оцінки техногенного навантаження на прилеглі території

- 3.2 Просторово-часова оцінка забруднення атмосферного повітря в зоні впливу цементного виробництва

- 3.3 Характеристика емісійного профілю сировинної бази (ділянка «Межигірська»)

3.4 Дослідження зонального розповсюдження забруднювачів та оцінка впливу метеорологічних умов на рівень запиленості

3.5 Кумулятивна оцінка ризиків для здоров'я населення в зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

3.6 Оцінювання відповідності систем пилогазоочистки вимогам ВАТ і розробка заходів з підвищення екологічної безпеки підприємства

4 Охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

4.1 Охорона праці та управління професійними ризиками на цементному підприємстві

4.2 Комплексні заходи з мінімізації впливу цементного виробництва

4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

Висновки

Бібліографічний список

5. Перелік графічного матеріалу (подається конкретний перерахунок аркушів з вказуванням їх кількості) _____

6. Консультанти з розділів:

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

7. Дата видачі завдання 22 вересня 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.	

Студент _____ Леонід ШОТ
(підпис)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Мар'яна ІВАНКІВ
(підпис)

УДК 504.05:666.94:504.06

Екологічна оцінка впливу цементного виробництва на атмосферу та прилеглі території і розробка заходів для зменшення екологічних ризиків. Шот Леонід Артурович. Кваліфікаційна робота. Кафедра екології та захисту довкілля. Львів, ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького, 2025. 73 с.

73 ст. текст. част., 14 табл., 9 рис., 49 джерел

У роботі здійснено комплексну екологічну оцінку впливу цементного виробництва на атмосферне повітря та прилеглі території на прикладі ПрАТ «Івано-Франківськцемент» із урахуванням сучасних викликів декарбонізації та вимог європейського екологічного законодавства. Встановлено, що цементне виробництво формує багатокomпонентне техногенне навантаження з домінуванням дрібнодисперсного пилу ($PM_{2.5}$, PM_{10}), оксидів азоту та супутніх мікрополютантів, зокрема важких металів.

Виявлено, що навіть за дотримання гранично допустимих концентрацій окремих забруднюючих речовин кумулятивний індекс неканцерогенного ризику для населення перевищує безпечні значення, особливо для вразливих груп – дітей, осіб похилого віку та осіб із хронічними захворюваннями органів дихання. З'ясовано, що ключову роль у формуванні підвищених ризиків відіграє синергетичний ефект взаємодії дрібнодисперсного пилу з газоподібними домішками, за якого пил виступає носієм токсичних компонентів і посилює їх негативний вплив на організм людини.

Обґрунтовано комплекс заходів для зменшення екологічних ризиків, який охоплює технологічну модернізацію обладнання, підвищення енергоефективності, вдосконалення систем пилогазоочистки, мінімізацію фугітивних викидів, контроль спалювання альтернативного палива, а також організаційні й біологічні заходи.

Проаналізовано питання охорони праці та захисту населення.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1 Глобальні виклики цементної індустрії: декарбонізація та European Green Deal	8
1.2 Ідентифікація поллютантів та їх вплив на біоту і клімат	11
1.3 Логістика як приховане джерело забруднення в умовах воєнного стану	17
1.4 Найкращі доступні технології як «еталон» екологізації цементної промисловості	20
2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	21
2.1 Характеристика об'єкта дослідження ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	21
2.2 Природно-кліматична характеристика зони впливу підприємства	26
2.3 Методика дослідження екологічних ризиків в умовах гармонізації регуляторних вимог України	28
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	32
3.1 Аналіз і системна інвентаризація джерел викидів як основа оцінки техногенного навантаження на прилеглі території	32
3.2 Просторово-часова оцінка забруднення атмосферного повітря в зоні впливу цементного виробництва	37
3.3 Характеристика емісійного профілю сировинної бази (ділянка «Межигірська»)	41
3.4 Дослідження зонального розповсюдження забруднювачів та оцінка впливу метеорологічних умов на рівень запиленості ...	45
3.5 Кумулятивна оцінка ризиків для здоров'я населення в зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	48

3.6	Оцінювання відповідності систем пилогазоочистки вимогам ВАТ і розробка заходів з підвищення екологічної безпеки підприємства	52
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ	61
4.1	Охорона праці та управління професійними ризиками на цементному підприємстві	61
4.2	Комплексні заходи з мінімізації впливу цементного виробництва	63
4.3	Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій	65
	ВИСНОВКИ.....	67
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	70

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку української економіки цементна промисловість відіграє стратегічну роль, стаючи базисом для майбутньої відбудови країни. Масштаби руйнувань цивільної та промислової інфраструктури, спричинені воєнними діями, формують безпрецедентний попит на будівельні матеріали, який, за прогнозами аналітиків, сягатиме десятків мільйонів тонн на рік. Проте, нарощування виробничих потужностей неминуче вступає у конфлікт з екологічними імперативами, продиктованими євроінтеграційним вектором України та глобальними кліматичними викликами.

Збільшення обсягів виробництва на існуючих підприємствах, що відбувається шляхом інтенсифікації технологічних процесів, має зворотний бік – зростання техногенного навантаження на атмосферний басейн. За статистичними даними, цементна галузь щорічно генерує від 400 до 440 тис тонн пилових викидів [44]. Аналіз динаміки розсіювання цих поллютантів свідчить, що хоча аерозольні шлейфи здатні мігрувати на відстань до 20 км, лєвова частка твердих часток гравітаційно осідає в радіусі 10–15 км від джерел емісії. Саме ця територія окреслюється як зона пріоритетного екологічного ризику, що потребує впровадження систем посиленого інструментального моніторингу та превентивних заходів захисту.

Ключовим викликом для вітчизняних підприємств стає імплєментація положень «European Green Deal» та адаптація до механізму прикордонного вуглецевого коригування, який з 2026 року вводить плату за вуглецевий слід імпортованої в ЄС продукції. Для цементних підприємств, зокрема для ПрАТ «Івано-Франківськцемент» – одного з найбільш технологічних виробників у Східній Європі – це означає необхідність глибинної трансформації підходів до екологічної безпеки. Попри впровадження енергоефективного «сухого» способу виробництва та часткове заміщення викопного палива альтернативним, підприємство залишається джерелом емісії

не лише парникових газів, а й специфічних забруднювачів: дрібнодисперсного пилу (PM2.5, PM10) та летких сполук важких металів.

Додатковим фактором ризику є умови воєнного часу, що характеризуються ускладненням логістики, змінами у якості сировини та обмеженням державного екологічного нагляду. У такій ситуації забезпечення екологічної безпеки стає питанням корпоративної відповідальності та умовою виживання бізнесу. Ігнорування екологічних аспектів може призвести не лише до соціальної напруги в регіоні, але й до втрати експортних ринків через невідповідність «зеленим» стандартам ЄС.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є проведення комплексної екологічної оцінки впливу виробничого циклу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» на компоненти довкілля та розробка науково обґрунтованої системи заходів щодо мінімізації екологічних ризиків в умовах інтенсифікації виробництва та переходу на альтернативні види палива.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі **завдання**:

- проаналізувати сучасний стан цементної галузі та ідентифікувати ключові екологічні виклики;
- здійснити аналіз джерел викидів забруднюючих речовин на всіх етапах життєвого циклу продукції;
- оцінити рівень техногенного навантаження на атмосферне повітря;
- дослідити акумуляцію пилових випадін на прилеглих територіях;
- проаналізувати ефективність існуючих систем пилогазоочищення;
- розробити науково обґрунтований комплекс заходів для зменшення екологічних ризиків.

Об’єкт дослідження – процеси формування техногенного навантаження на навколишнє середовище внаслідок виробничої діяльності підприємств цементної промисловості (на прикладі промислового вузла ПрАТ «Івано-Франківськцемент»).

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Глобальні виклики цементної індустрії: декарбонізація та European Green Deal

На сучасному етапі розвитку світова економіка перебуває у стані трансформації, спричиненої кліматичними змінами. Цементна промисловість, яка щорічно виробляє понад 4,1 млрд тонн продукції, є джерелом близько 8% глобальних антропогенних викидів CO₂. За даними Міжнародного енергетичного агентства, для досягнення цілей Паризької угоди сектор має знизити прямі викиди вуглекислого газу до 1,1 Гт/рік до 2050 року, що вимагає фундаментальних змін у технологічних процесах [38].

Ключовим регуляторним інструментом, що визначатиме майбутнє галузі, є стратегія «European Green Deal» [43] та механізм транскордонного вуглецевого регулювання (Carbon Border Adjustment Mechanism) [32]. З 1 січня 2026 року розпочнеться повна імплементація СВАМ, що зобов'яже імпортерів цементу до ЄС сплачувати за різницю між ціною вуглецю в країні виробництва та в системі EU ETS (Схема торгівлі викидами Європейського Союзу) [44]. За оцінками GMK Center [37], Україна входить до переліку країн з найвищими ризиками втрати експортних позицій: у період 2026–2030 років сумарні втрати експорту можуть перевищити 4.6 млрд доларів США, а цементний сектор ризикує повністю припинити постачання до ЄС після 2030 року, якщо не відбудеться глибинна декарбонізація виробництва [36].

За даними міжнародних аналітичних звітів за 2024–2025 роки, світове виробництво цементу перевищило 4,1 млрд тонн на рік, при цьому на Китай припадає понад 50% цього обсягу. У 2025 році світова цементна промисловість залишається одним із найбільших індустріальних емітентів парникових газів, генеруючи близько 7% глобальних викидів CO₂ [30, 36].

Стан цементної промисловості України у 2024–2025 роках характеризується спробою балансувати між викликами воєнного часу та підготовкою до масштабної відбудови. Якщо у 2021 році обсяг виробництва цементу досяг пікового значення в 11,5 млн тонн, то у 2022 році відбувся спад

до 5,4 млн тонн. Проте вже у 2023 році зафіксовано відновлення галузі до рівня 7,43 млн тонн (+37% до попереднього року), а у 2024 році – 7,97 млн т цементу, що свідчить про адаптацію ринку та зростання попиту на будівельні матеріали [28]. Проте, за оцінками Consumer Business Research [37], потреби післявоєнної відбудови вимагатимуть збільшення потужностей до 15–16 млн тонн/рік. Це створює екологічний парадокс: країна змушена нарощувати виробництво «брудного» продукту для відновлення інфраструктури, водночас намагаючись інтегруватися в «зелений» ринок Європи.

За даними Global Efficiency Intelligence [36], Україна, поряд з Китаєм та Польщею, наразі демонструє одні з найвищих у світі показників інтенсивності викидів забруднюючих речовин (NO_x, SO₂, PM) на тону виробленого цементу, що зумовлено використанням застарілих енергетичних міксів та недостатньою ефективністю систем очистки на старих підприємствах. Винятком є модернізовані заводи, такі як ПрАТ «Івано-Франківськцемент» та заводи CRH, які інвестують у енергоефективні технології.

Ключовими гравцями ринку, що формують промисловий потенціал та входять до асоціації «Укрцемент», залишаються ПрАТ «Івано-Франківськцемент» [25] (єдине підприємство з повністю українським капіталом) – лідер галузі з потужністю 3,6 млн тонн/рік, а також міжнародні групи CRH (ПАТ «Подільський цемент», ПрАТ «Миколаївцемент») та Dycerhoff; «Євроцемент-Україна» (Балаклійський цементний завод) – потужність 4,4 млн тонн/рік, проте діяльність ускладнена через руйнування та безпекові фактори.

Загальна проектна потужність українських заводів оцінюється у 20–22 млн тонн на рік, проте реальний рівень завантаження потужностей в останні роки не перевищував 50–53% [25].

Попри наявність потужної сировинної бази, українська цементна промисловість характеризується суттєвим технологічним відставанням порівняно з країнами ЄС та Азії. Головною проблемою є експлуатація застарілих енергоємних технологій. Станом на 2021 рік понад 75% українських підприємств все ще використовували застарілу енергоємну технологію «мокрого» способу виробництва.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика енергоємності виробництва клінкеру (аналіз технологічного відставання)

Країна / Регіон	Технологія	Енергоємність, МДж/т клінкеру
Україна	Мокрий спосіб	5600 – 8000
Китай	Сухий спосіб	4710
Індія	Сухий спосіб	4710
Західна Європа	Сухий спосіб	4040
Бразилія	Сухий спосіб	3600
Японія	Сухий спосіб	3100
Найкращі доступні технології	Нові сухі печі з прекальцинаторами	2950

Порівняльний аналіз енергоефективності (табл. 1.1) демонструє критичну різницю у витратах енергії на випал клінкеру (напівфабрикату цементу):

За даними порівняльного аналізу енергоефективності:

– «мокий» спосіб виробництва, який все ще використовується на більшості українських підприємств, потребує витрат теплової енергії на рівні 5600–8000 МДж/т клінкеру. Це зумовлено необхідністю випаровування води (вологість шламу 36-42%) у довгих обертових печах.;

– «сухий» спосіб, що є стандартом у ЄС та Японії, споживає в середньому 2950–3100 МДж/т клінкеру;

– найкращі доступні технології, рекомендовані директивами ЄС, дозволяють знизити цей показник до 2700 МДж/т (сучасні сухі печі з прекальцинаторами).

Висока енергоємність безпосередньо впливає на вуглецевий слід продукції. При виробництві 1 тонни клінкеру в атмосферу в Україні в середньому емітується 920–950 кг, тоді як середньосвітовий показник знизився до 617 кг/т [27, 36]. Це створює бар'єри для українського цементу на ринках ЄС через механізм транскордонного вуглецевого регулювання.

Окрім прямих виробничих викидів, критичним фактором екологічного навантаження є недосконала логістика. Втрати цементу та сировини при транспортуванні у відкритому рухомому складі (вагони, автотранспорт) становлять:

– 1,28% від маси вантажу при залізничних перевезеннях;

– 1,4% при використанні автотранспорту. У абсолютному вимірі це означає, що з одного вагона вантажопідйомністю 70 тонн у довкілля розсіюється понад 1000 кг пилу, що створює значне вторинне забруднення вздовж транспортних магістралей.

У контексті інтеграції до ЄС, українські виробники зобов'язані імплементувати положення Директиви 2010/75/EU про промислові викиди. Згідно з довідковими документами інноваційних технологій та методів управління, встановлюються жорсткі нормативи викидів, яких важко досягти на застарілому обладнанні. Зокрема, допустимі концентрації викидів оксидів азоту для нових сухих печей у ЄС обмежені рівнем 200–450 мг/м³, тоді як для старих печей мокрого способу допускається 400–800 мг/м³, а викиди діоксиду сірки – 50–400 мг/м³. Для порівняння, на застарілому обладнанні українських заводів концентрація у відхідних газах може досягати 1000–5000 мг/м³ через неповне згоряння палива. Сучасні рукавні фільтри повинні забезпечувати концентрацію пилу у відхідних газах на рівні 10–20 мг/м³ [13, 46].

Стан цементної промисловості України характеризується значним розривом між виробничим потенціалом та технологічною ефективністю. Висока енергоємність (до 8000 МДж/т) та значні логістичні втрати (>1 т з вагона) знижують конкурентоспроможність галузі в умовах транскордонного вуглецевого регулювання. Для відповідності європейським екологічним стандартам необхідна комплексна модернізація: перехід на сухий спосіб виробництва, перехід на вертикальні валкові млини, які споживають на 30–50% менше електроенергії порівняно з кульовими млинами, та впровадження високоефективних систем пилоочищення.

1.2 Ідентифікація полутантів та їх вплив на біоту і клімат

Цементна промисловість є однією з базових галузей індустріальної економіки та водночас належить до категорії найбільш енергоємних і кліматично інтенсивних промислових секторів, що формують значне антропогенне навантаження на атмосферне повітря як на локальному, так і на глобальному рівнях.

За класифікацією Міжурядової групи експертів зі зміни клімату [41], цементне виробництво віднесене до «важкодекарбонізованих» (hard-to-abate) галузей, оскільки поєднує процесні та енергетичні викиди парникових газів, які

не можуть бути усунуті виключно шляхом підвищення енергоефективності [40]. За сучасних умов воєнного стану (ризик перебоїв енергопостачання, обмеження доступу до ресурсів, ускладнення виробничого контролю) та одночасного зростання потреби у будівельних матеріалах для відбудови, екологічна оцінка цементного виробництва має здійснюватися ризик-орієнтовано, з урахуванням кліматичних змін, екологізації, декарбонізації та вимог Європейського зеленого курсу і механізму транскордонного вуглецевого регулювання [32, 33, 43].

Виробництво цементу є складним фізико-хімічним процесом, який супроводжується викидами широкого спектра забруднюючих речовин (поллютантів) у всі компоненти біосфери.

Цемент є одним із базових матеріалів сучасної будівельної індустрії, що визначає масштаби розвитку інфраструктури, урбанізованих територій та промислового будівництва. У глобальній практиці домінуюче застосування отримав портландцемент, виробництво якого ґрунтується на складному багатостадійному технологічному процесі з високим рівнем енергоспоживання та значним екологічним навантаженням.

Основні сировинні компоненти цементу (вапняк, крейда, глинисті матеріали) піддаються термічній обробці в обертових печах при температурах до 1450 °C, у результаті чого формується гранульований проміжний продукт – цементний клінкер. Надалі клінкер подрібнюється у млинах до тонкодисперсного стану з утворенням цементного порошку. До складу кінцевого продукту, як правило, вводиться близько 5 % гіпсу для регулювання термінів тужавлення, а також можуть додаватися неклінкерні мінеральні компоненти техногенного походження, зокрема вапняк, доменний шлак або зола теплових електростанцій, що працюють на вугіллі.

Технологія виробництва цементу характеризується високою енергоємністю на всіх етапах виробничого циклу та є одним із найбільших джерел промислових викидів CO₂ і супутніх парникових газів. За узагальненими оцінками, саме цементне виробництво забезпечує до 83 % загального енергоспоживання у секторі нерудних корисних копалин та формує близько 94 % викидів CO₂ у межах цього промислового комплексу. Частка енергетичних витрат у структурі собівартості цементу коливається в межах 40–70 %, що свідчить про критичну залежність галузі від енергетичних ресурсів.

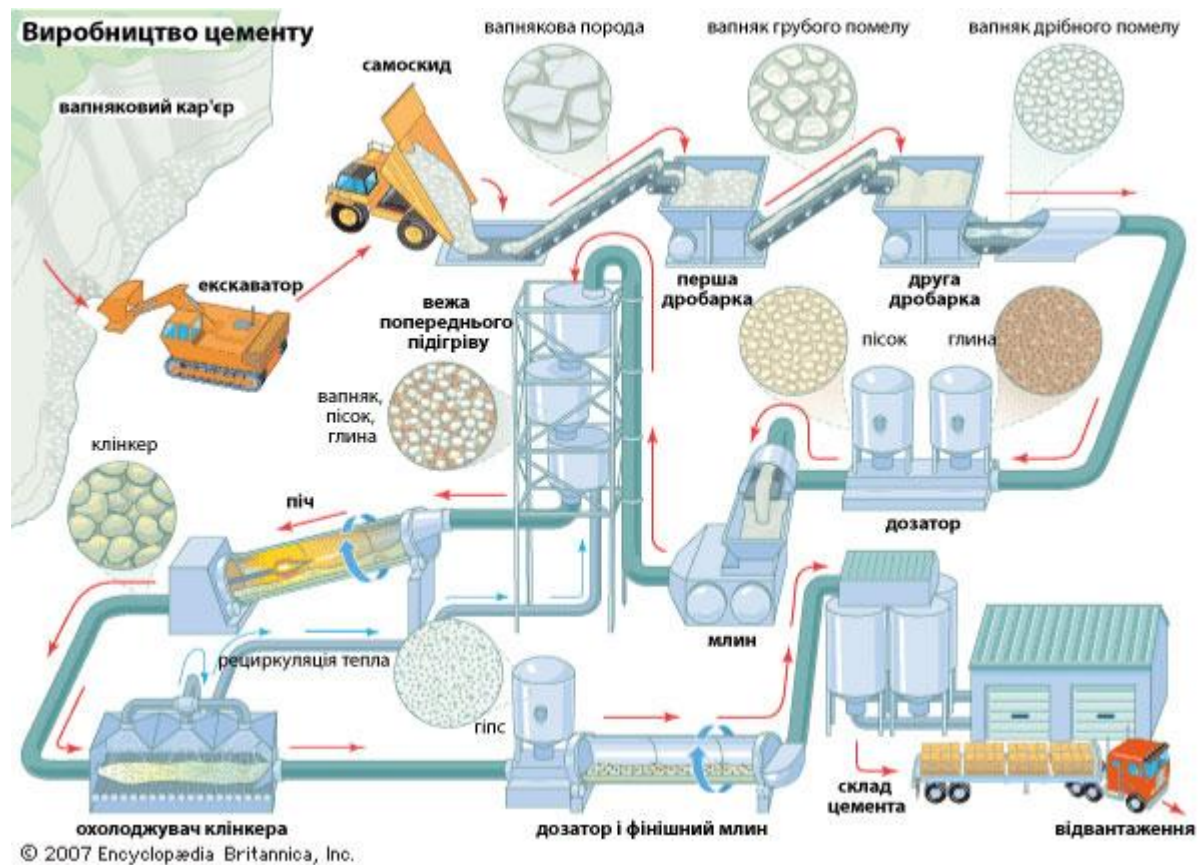


Рисунок 1.1 – Повна технологічна схема виробництва цементу: від підготовки сировинної суміші до складування готової продукції [20]

Найбільш енергоємним і водночас екологічно значущим етапом є процес випалу цементного клінкера з вапняку та крейди шляхом їх нагрівання до температур вище **950 °C**, під час якого відбувається термічний розклад карбонатів кальцію з виділенням значних обсягів **CO₂**. Слід зазначити, що портландцемент традиційного складу містить до **95 % клінкера**, що зумовлює його високий вуглецевий слід. Додаткові обсяги електричної енергії споживаються на стадіях дроблення та тонкого помелу сировини і готового цементу, що ще більше підсилює загальне техногенне навантаження цементної промисловості на довкілля.

Таблиця 1.2 – Питомі витрати енергоресурсів при «сухому» способі виробництва клінкера залежно від виду палива

Параметр	Природний газ	H ₂ (водень)
Витрати природного газу, кг	77,54	0
Витрати водню, кг	0	34,02
Витрати тепла, МДж	3877,05	4082,4
Витрати електричної енергії, кВт·год	118,5	109,76

Таким чином, технологічний цикл виробництва портландцементу включає послідовні стадії: підготовка сировини (вапняк, глина, мергель) → випал клінкеру → охолодження → помел клінкеру з гіпсом та мінеральними добавками → складування і відвантаження. Критичною стадією з погляду екологічних впливів є випал у обертовій печі з формуванням клінкеру за температур порядку ~ 1450 °C, при цьому у зоні декарбонізації карбонатів (кальцинації) температури перевищують $\sim 900\text{--}950$ °C [30, 33]. Саме тут формуються:

- процесні викиди CO_2 , які не можна повністю усунути лише переходом на «чистіші» види палива [1, 4];
- викиди згоряння (CO_2 , NO_x , SO_2 , CO) – залежать від типу палива, режимів горіння, ефективності теплообміну [25];
- пилоутворення (організовані та дифузні джерела), яке визначає локальну якість повітря та рівень випадінь на прилеглі території [7, 36].

Для цементних підприємств ключовим локальним чинником є пил (зокрема, дрібнодисперсний $\text{PM}_{2.5}$ і PM_{10}), який формується як у газовому потоці (піч, охолоджувач, млини), так і через дифузні джерела (пересипання, склади, відкриті транспортні операції, внутрішньомайданчикові дороги) [18]. Дрібнодисперсний пил є пріоритетним з огляду на доведені ризики для здоров'я; WHO Air Quality Guidelines (2021) задають науково обґрунтовані орієнтири для оцінювання впливів $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ та супутніх газів [49].

Цементний пил є багатокомпонентною системою, що містить оксиди кальцію (CaO – 60–67%), кремнію (SiO_2 – 17–25%), алюмінію (Al_2O_3 – 3–8%) та заліза (Fe_2O_3 – 0,3–6%), а також домішки важких металів.

Критичну небезпеку становлять дрібнодисперсні фракції PM_{10} та $\text{PM}_{2.5}$. За даними наукових досліджень 2025 року, у зонах впливу цементних заводів концентрація PM_{10} протягом доби стабільно перевищує рівні $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} , що свідчить про домінування ультрадисперсних аерозолів [46]. Згідно з рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я [49], безпечний рівень концентрації $\text{PM}_{2.5}$ є критично низьким, оскільки ці частки проникають через альвеолярний бар'єр у кровотік. Емпірично доведено, що зростання концентрації PM_{10} на кожні 10 мкг/м^3 корелює з підвищенням смертності від раку легень на 8% та зростанням хронічних респіраторних захворювань на 7%/

У районах розташування цементних заводів зафіксовано акумуляцію пилу в кількості, що перевищує 58 кг/га на місяць, що створює критичне навантаження на ґрунтові екосистеми.

Згідно з даними *Toxics* [36], у складі пилу сучасних заводів, що використовують альтернативне паливо, виявляють підвищені концентрації хлоридів та сульфатів. Осідання такого пилу на ґрунти в радіусі 10–15 км призводить до їх підлужнення (зростання рН > 8.0) та цементзації поверхневого шару, що порушує водно-повітряний режим кореневих систем рослин.

Цементна промисловість є одним із найбільших індустріальних емітентів діоксиду вуглецю. За даними Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату (IPCC) [40–41], на цю галузь припадає близько 7–8% глобальних антропогенних викидів CO₂. Аналіз технологічного циклу показує, що на виробництво **1 тонни клінкеру виділяється 900–1000 кг CO₂**. Структура викидів розподіляється наступним чином:

- 60–62 % CO₂ утворюється в результаті хімічної реакції декарбонізації вапняку ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) у печі;
- решта 38–40 % – генеруються внаслідок спалювання викопного палива для підтримки температури 1450°C. Викиди оксиду вуглецю виникають через неповне згоряння палива та окислення органічних домішок у сировині. Концентрація CO у відхідних газах застарілих печей може досягати пікових значень 1000–5000 мг/м³, що вимагає суворого контролю процесу горіння. Для прикладу, валовий викид лише одного підприємства може складати понад 169 тонн/рік [37].

Українські заводи характеризуються високою інтенсивністю викидів оксидів азоту через використання високотемпературних обертових печей. За даними UNECE [48], навіть за наявності систем селективного некаталітичного відновлення, залишкові концентрації NO_x можуть сягати 250–500 мг/Нм³, що є прекурсором утворення тропосферного озону та кислотних дощів.

Процеси високотемпературного випалу клінкеру супроводжуються утворенням кислотоутворюючих газів:

- оксиди азоту (NO_x) формуються переважно як «теплові NO_x» (з атмосферного азоту при T > 1400 °C) та «паливні NO_x». Для печей сухого способу в країнах ЄС встановлено граничні нормативи викидів на рівні 200–450 мг/м³, тоді як для менш ефективних печей мокрого способу, поширених в

Україні, цей показник може сягати 400–800 мг/м³. NO_x є прекурсорами тропосферного озону та кислотних дощів.

- діоксид сірки (SO₂) утворюється при окисненні сульфідів (піриту) у сировині та сірки у паливі. Допустимі рівні викидів згідно з європейськими директивами становлять 50–400 мг/м³. Викиди SO₂ викликають закислення ґрунтів та деградацію лісових масивів.

Особливу екотоксикологічну небезпеку становлять важкі метали, які надходять із сировиною та альтернативним паливом і класифікуються за леткістю:

- високолеткі (І клас): ртуть (Hg), талій (Tl). Ртуть майже не затримується у клінкері (98% виводиться з газами), що робить цементні заводи значним джерелом атмосферної ртуті. Нормативні обмеження для суми Hg + Cd + Tl становлять < 0,2 мг/м³;

- частково леткі (ІІ клас): кадмій (Cd), свинець (Pb), селен (Se). Вони конденсуються на частинках пилу і циркулюють у системі піч-теплообмінник;

- газоподібні хлориди та фториди (HCl, HF) створюють корозійне середовище та можуть призводити до накопичення токсичних сполук у ґрунтах радіусом до 2–5 км від джерела викиду [38]. Середні викиди HCl становлять 3,6–4,2 мг/м³. Інвентаризація українських підприємств фіксує викиди марганцю (0,098 т/рік), хрому, фторидів та навіть бенз(а)пірену (0,00054 т/рік) [41].

Використання твердого відновленого палива з побутових відходів є глобальним трендом заміщення вугілля. Проте, дослідження 2025 року (Morforopoulos et al.) [46] довело пряму кореляцію між вмістом хлору в паливі з побутових відходів та емісією діоксинів/фуранів та важких металів (ртуть, талій). Якщо вміст хлору в паливі перевищує 0,078%, стандартні фільтри не здатні повністю вловити леткі сполуки ртуті, які згодом осідають у трофічних ланцюгах. Ртуть та кадмій мають кумулятивний ефект, викликаючи нефротоксичні та нейротоксичні ураження у фауни та населення прилеглих територій.

Осідання цементного пилу призводить до деградації ґрунтового покриву та пригнічення рослинності. Пил змінює рН ґрунту в лужний бік, що порушує мінеральне живлення рослин та мікробіологічну активність.

Тверді частинки утворюють кірку на листі рослин, блокуючи продихи. Це призводить до зниження інтенсивності фотосинтезу, хлорозу листя та

зменшення врожайності сільськогосподарських культур у радіусі до 2–5 км від заводу.

Поверхневий стік з промислових майданчиків забруднює водойми завислими речовинами та нафтопродуктами, підвищуючи каламутність води та порушуючи кисневий режим гідробіонтів.

1.3 Логістика як приховане джерело забруднення в умовах воєнного стану

В умовах воєнного стану та порушення традиційних логістичних ланцюгів, транспортно-складські операції цементних підприємств трансформувалися з допоміжного виробничого етапу в домінуюче джерело неорганізованих (фугітивних) викидів. Аналіз наукових джерел 2019–2025 років дозволяє стверджувати, що логістика формує прихований сегмент екологічного ризику, який часто недооцінюється при розрахунку валових викидів стаціонарних джерел.

Специфіка цементу та сировинних матеріалів (клінкеру, шлаку, гіпсу) як дрібнодисперсних вантажів зумовлює високі втрати при їх переміщенні. Згідно з дослідженнями, втрати матеріалу внаслідок вивітрювання та просипання через негерметичність тари сягають критичних значень, що прямо корелює із вторинним забрудненням атмосфери (табл. 1.2).

Таблиця 1.3 – Нормативні та фактичні втрати цементних вантажів при транспортуванні (за даними Кривільова С. П., Власенко В. В., Цвіркун Д. О.) [18]

Спосіб транспортування / Тип рухомого складу	Втрати від маси вантажу, %	Екологічний еквівалент (емісія пилу з 1 одиниці транспорту)
Залізничний транспорт:		
Криті вагони-хопери / цистерни	0,4 – 0,5 %	280–350 kg (на вагон 70 т)
Відкриті вагони (напіввагони)	1,28 %	896 kg (на вагон 70 т)
Автомобільний транспорт:		
Автоцементовози / самоскиди	1,40 %	350 kg (на фуру 25 т)

В умовах воєнного стану, коли залізнична логістика ускладнена пошкодженням інфраструктури, частка автомобільних перевезень зростає. Наукові дані свідчать, що автомобільний транспорт є найбільш екологічно агресивним: коефіцієнт втрат становить 1,4%. Це означає, що при перевезенні 1 млн тонн цементу автошляхами, близько 14 000 тонн дрібнодисперсного пилу розсіюється у придорожніх смугах, формуючи зони стійкого забруднення ґрунтів та повітря [18]/

За дослідженнями Савіцької І.О., Грицюк Ю.І. критичними точками пиловиділення є вузли пересипання матеріалів. За даними інструментальних вимірів, концентрація пилу в бункерних ангарах при розвантаженні автосамоскидів може досягати пікових значень 270–450 мг/м³, а при інтенсивному сукупному розвантаженні – перевищувати 1500 мг/м³ [20]. Це у 250 разів перевищує гранично допустиму концентрацію для робочої зони (6 мг/м³).

Основними факторами інтенсифікації викидів на цих етапах є:

1. аеродинамічний удар: при падінні сипучого матеріалу з висоти витісняється об'єм повітря, насичений частинками РМ10 та РМ2.5;
2. вітрова ерозія. Відкриті склади клінкеру та вугілля, які займають значні площі на підприємствах (наприклад, склад клінкеру ПрАТ «Івано-Франківськцемент» працює 8760 год/рік), є джерелами постійного вторинного пилоутворення. Емісія пилу при зберіганні та перевантаженні коливається від 7 до 52 г/т переробленого вантажу.

Окрім пилу, внутрішньозаводська та зовнішня логістика генерує викиди продуктів згоряння палива. Кар'єрна техніка (екскаватори, бульдозери Komatsu, самоскиди Volvo, MAN) та магістральні тягачі спалюють дизельне паливо, викидаючи оксиди азоту, оксид вуглецю та сажу. Згідно з дозволом на викиди одного з підприємств галузі, валові викиди від пересувних джерел та спецтехніки можуть складати:

- сажа: ~26,3 т/рік;
- оксид вуглецю: ~169,8 т/рік;
- вуглеводні насичені (C12-C19): ~50,9 т/рік.

Специфічним, але вкрай небезпечним аспектом логістичного забруднення є стирання дорожнього покриття та автомобільних шин. Дослідження [30] підтверджують, що цей процес супроводжується надходженням в атмосферу аерозолів важких металів: цинку, свинцю, нікелю та хрому. Враховуючи, що середня відстань транспортування сировини від кар'єру до заводу становить близько 7,5 км, а мережа внутрішніх автодоріг великого заводу перевищує 17 км, лінійні джерела забруднення створюють значне навантаження на екосистеми.

В умовах євроінтеграції Україна має адаптувати логістичні процеси до вимог Директиви 2010/75/EU про промислові викиди [3], яка регламентує не лише викиди з труб, а й фугітивні викиди з промислових майданчиків. Згідно з кращими доступними технологіями, рекомендовано:

- герметизацію конвеєрних ліній;
- використання закритих складів (силосів) замість відкритих майданчиків;
- застосування технологій «сухого туману» та аспірації у вузлах пересипання.

1.4 Найкращі доступні технології як «еталон» екологізації цементної промисловості

В умовах євроінтеграції України та гармонізації національного екологічного законодавства з нормами Європейського Союзу, ключовим інструментом екологізації промисловості стає концепція BAT (Best Available Techniques) – найкращих доступних технологій та методів управління. Технічною основою для впровадження BAT є довідкові документи BREF (BAT Reference Documents), які встановлюють граничні нормативи викидів та описують технологічні рішення для їх досягнення [32].

Для цементної промисловості основним нормативним документом є CLM BREF (довідковий документ щодо найкращих доступних технологій у виробництві цементу, вапна та оксиду магнію), розроблений відповідно до Директиви 2010/75/EU про промислові викиди [3].

Згідно з міжнародними оглядами 2025 року та європейськими директивами, впровадження ВАТ передбачає досягнення наступних граничних рівнів емісії для обортових печей: тверді частинки (пил): $< 10\text{--}20 \text{ мг/Нм}^3$. Для порівняння, на багатьох українських підприємствах, що не пройшли модернізацію, концентрація пилу може досягати $50\text{--}100 \text{ мг/Нм}^3$ і вище [36]; оксиди азоту: $200\text{--}450 \text{ мг/Нм}^3$ (для печей сухого способу з попереднім нагріванням); діоксид сірки: $50\text{--}400 \text{ мг/Нм}^3$; аміак: $< 30\text{--}50 \text{ мг/Нм}^3$.

Еталонним рішенням для пилоочищення згідно з інноваційними технологіями є відмова від електрофільтрів (які менш ефективні при пусках/зупинках печі та високому питомому опорі пилу) на користь рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією або гібридних фільтрів. Сучасні дослідження 2024–2025 років доводять ефективність двоступеневих систем очищення, що поєднують:

1. вдосконалені циклони дифузорового типу (попереднє очищення);
2. рукавні фільтри з механізмом періодичного струшування та акустичною коагуляцією. Такі системи дозволяють досягти ступеня очищення 99,99% і забезпечити залишкову запиленість на рівні $20\text{--}25 \text{ мг/м}^3$, що відповідає європейським стандартам. Крім того, сучасні системи дозволяють сепарувати вловлений пил, повертаючи грубу фракцію у виробництво (рециклінг), а цінну тонкодисперсну фракцію використовувати як добавку для високоміцних бетонів.

Екологізація згідно з BREF нерозривно пов'язана з енергоефективністю. «Еталоном» є повний перехід на сухий спосіб виробництва з використанням багатоступеневих циклонних теплообмінників та декарбонізаторів. Порівняльний аналіз енергоємності демонструє прірву між технологіями:

- Ват (сучасна суха піч): $2950\text{--}3000 \text{ МДж/т}$ клінкеру;
 - мокрий спосіб (поширений в Україні): $5600\text{--}8000 \text{ МДж/т}$ клінкеру.
- Заміна кульових млинів на вертикальні валкові млини також визнана найкращою доступною технологією, оскільки валкові млини споживають на $30\text{--}50\%$ менше електроенергії (близько $15,8\text{--}18 \text{ кВт}\cdot\text{год/т}$ проти $40 \text{ кВт}\cdot\text{год/т}$ у кульових) і дозволяють одночасно сушити та молоти сировину.

2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика об'єкта дослідження ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

Приватне акціонерне товариство «Івано-Франківськцемент» (далі – ПрАТ «Івано-Франківськцемент») обрано як репрезентативний об'єкт дослідження, що демонструє складну динаміку техногенного впливу на довкілля в умовах переходу від застарілих ресурсоємних технологій до європейських стандартів виробництва. Підприємство є унікальним прикладом промислового комплексу, який, забезпечуючи понад третину потреб цементного ринку України, одночасно виступає потужним джерелом емісії парникових газів та аерозолів, що вимагає детального екологічного аналізу в контексті глобальних кліматичних змін та локальної екологічної безпеки.



Рисунок 2.1 – ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

Промисловий майданчик розташований у селі Ямниця Івано-Франківського району на відстані 7 км на північ від обласного центру. Географічні координати та орографія місцевості (розташування у Бистрицькій депресії на висотах 250–300 м н.р.м.) визначають специфіку розсіювання забруднюючих речовин.

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» – єдиний в Україні цементний завод, що на 100% належить національному капіталу і пройшов повну технологічну модернізацію, відмовившись від енергоємного «мокрого» способу виробництва на користь «сухого» [25]. Частка якого на внутрішньому ринку у I кварталі 2024 року перевищила 40%.

Підприємство являє собою високотехнологічний кластер, що об'єднує виробництва цементу, фіброцементних виробів (шиферу), гіпсу та сухих будівельних сумішей. Виробнича потужність цементного напрямку становить близько 4,0 млн тонн/рік, що робить його одним із найбільших у Європі single-site заводів (заводів на одному майданчику).

Виробничі потужності підприємства станом на 2024–2025 роки складають:

- виробництво цементу: проєктна потужність – 3,6 млн тонн/рік;
- виробництво клінкеру: фактична потужність – 3,05 млн тонн/рік;
- номенклатура: понад 300 найменувань, включаючи портландцементи (ПЦ І-500, ПЦ ІІ/А-ІІІ-400), тампонажні та дорожні цементы, а також безазбестові покрівельні листи.

Станом на 2025 рік стратегія розвитку підприємства базується на моделі вертикальної інтеграції та екологічної модернізації, спрямованої на відповідність стандартам ЄС (EN 197-1), оскільки продукція ІФС сертифікована для експорту до 5 країн Євросоюзу. Це накладає на менеджмент зобов'язання щодо впровадження системи автоматизованого моніторингу викидів та дотримання принципів сталого розвитку.

Порівняльний аналіз свідчить (табл. 2.1), що перехід від «мокрого» до «сухого» способу виробництва цементу є ключовим технологічним чинником зниження екологічного навантаження, який одночасно впливає на енергетичну, кліматичну та санітарно-екологічну складові. Найбільш показовим є скорочення енергоємності випалу з 5600–8000 до близько 3000 МДж/т клінкеру, що забезпечує двократне і більше зменшення споживання палива та, відповідно, зниження паливних викидів CO₂ майже на 20–30%, що відповідає цілям Європейського зеленого курсу та Паризької кліматичної угоди.

Таблиця 2.1 – Еколого-технологічна ефективність переходу на «сухий» спосіб виробництва цементу (порівняльний аналіз)

Показник	«Мокрий» спосіб (застаріла технологія)	«Сухий» спосіб (сучасний стан, BAT)	Екологічний ефект / відповідність стандартам
Енергоємність випалу, МДж/т клінкеру	5600 – 8000	≈ 3000	Зниження енергоспоживання у 2,0–2,5 раза; відповідність IEA Technology Roadmap for Cement
Витрати умовного палива, кг у.п./т клінкеру	≈ 1600	≈ 770	Скорочення викидів CO ₂ від спалювання палива на 45–55 %
Обсяг відхідних газів, нм ³ /кг клінкеру	3,0 – 4,5	1,4 – 1,6	Зменшення газового потоку для очищення приблизно на 40–50 %
Концентрація пилу на виході з газоочистки, мг/нм ³	> 100	20 – 25	Досягнення рівнів BAT-AEL; відповідність Директиві 2010/75/EU (IED)
Питома емісія CO ₂ (пряма), т CO ₂ /т цементу	0,9 – 1,1	0,55 – 0,65	Наближення до середньосвітових BAT- орієнтирів; передумова відповідності EU Green Deal / CBAM
Стійкість до вторинного пиління	Низька (висока вологість шламу)	Висока	Зменшення дифузних пилових викидів і навантаження на прилеглі території

Суттєве зменшення обсягу відхідних газів (до 1,4–1,6 нм³/кг клінкеру) не лише знижує навантаження на газоочисне обладнання, а й підвищує ефективність уловлювання пилу, що підтверджується зменшенням концентрацій пилу до 20–25 мг/нм³, тобто до рівнів, асоційованих з BAT-AEL. Це має принципове значення для якості атмосферного повітря прилеглих територій, особливо в умовах зростання кліматичної посушливості та частоти вітрових епізодів.

У контексті Європейського зеленого курсу, механізму CBAM та післявоєнної відбудови України, впровадження «сухого» способу виробництва слід розглядати не як окремий технологічний захід, а як системну основу

екологізації цементної галузі, що створює передумови для досягнення кліматичних цілей, зниження локальних екологічних ризиків і гармонізації з європейськими нормативними вимогами.

Сировинна база та гірничодобувний комплекс

Основу ресурсної незалежності підприємства становить Межигірсько-Маринопільське родовище карбонатної сировини (вапняків та мергелів), розташоване за 9 км від проммайданчика (с. Межигірці). За даними Держгеонадр, запаси родовища (категорії А+В+С1) забезпечують роботу заводу на понад 50 років.

Технологія видобутку на ділянці «Межигірська» (площа 94.9 га) є унікальним об'єктом екологічного аналізу. Згідно з Дозволом на викиди (2023) та Звітом з ОВД (реєстр. №20228259895), тут застосовується комбінований метод розробки [19]:

3. традиційний буровибуховий метод використовується для міцних вапняків. Є джерелом залпових викидів неорганічного пилу та оксидів азоту (від вибухових речовин);

4. безвибуховий (комбайновий) метод використання кар'єрних комбайнів (surface miners) типу Wirtgen або Vermeer. Цей метод є прикладом впровадження «зелених» технологій, оскільки елімінує сейсмічний вплив та зменшує пилоутворення на 70–80% порівняно з вибухами.

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» є піонером переходу на енергоефективний сухий спосіб виробництва в Україні. Процес випалу клінкеру здійснюється в обертових печах із попередніми кальцинаторами (precalciners), що дозволяє використовувати тепло відхідних газів для підготовки сировини. Це знижує питомі витрати палива до 3000–3200 МДж/т клінкеру, що відповідає показникам Best Available Techniques згідно з BREF Cement [39].

Критичним аспектом екологічної оцінки є паливний мікс підприємства. В умовах дефіциту вугілля та зростання цін на газ, завод активно нарощує частку альтернативного палива. У 2024 році рівень термічного заміщення досяг 15–20%, а у планах до 2030 року – 40–50%.

Використовуються такі види альтернативного палива:

– підготовлене тверде паливо – RDF/SRF (Refuse Derived Fuel) з комунальних та промислових відходів;

- зношені автомобільні шини спалюються цілими або подрібненими безпосередньо в декарбонізаторі;

- відходи деревообробки.

Спалювання твердого палива створює специфічний профіль емісії. Якщо класичне вугілля дає переважно CO_2 , SO_2 та пил, то тверде паливо є джерелом мікрополutantів: хлороводню (HCl), фтороводню (HF) та летких важких металів (ртуть, кадмій, талій).

Основними організованими джерелами викидів на промайданчику є димові труби обертових печей, холодильників клінкеру та цементних млинів. Система очистки включає:

- рукавні фільтри встановлені на нових технологічних лініях (№3). Забезпечують ефективність вловлювання пилу до 99,9% (концентрація на виході $<10\text{--}20 \text{ мг/Нм}^3$). Це відповідає жорстким нормативам Директиви 2010/75/ЄС;

- електрофільтри експлуатуються на старіших вузлах. Їх ефективність залежить від стабільності напруги та вологості газів, і може знижуватися при пусконаладжувальних режимах ("CO-trips").

За даними екологічної звітності за 2023–2024 роки [25], валові викиди забруднюючих речовин ПрАТ «Івано-Франківськцемент» становили 1585 тонн (без врахування CO_2), що є одним із найбільших показників серед стаціонарних джерел області. Однак, у перерахунку на одиницю продукції (питомі викиди), підприємство демонструє кращу динаміку, ніж середньогалузеві показники в Україні, завдяки модернізації.

Унікальною рисою управління відходами є впровадження принципів циркулярної економіки. Завод не лише утилізує зовнішні відходи (шини, сміття) як паливо, але й використовує техногенну сировину (золашлаки Бурштинської ТЕС, гіпс з десульфуризації газів) як добавки до цементу. Це дозволяє виробляти екологічні марки цементу (СЕМ II, СЕМ III) зі зниженим вмістом клінкеру, що зменшує вуглецевий слід продукції на 20–30% [2, 12, 23]. Таким чином, ПрАТ «Івано-Франківськцемент» є складним техногенним об'єктом, де перетинаються передові "зелені" технології та ризики, пов'язані з використанням відходів як палива. Це визначає необхідність застосування комплексного підходу до моніторингу, який би враховував не лише валові викиди, а й їх токсикологічний склад.

2.2 Природно-кліматична характеристика зони впливу підприємства

Екологічна оцінка впливу цементного виробництва неможлива без детального аналізу умов розсіювання викидів, які визначаються кліматичними та орографічними факторами. Проммайданчик ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (с. Ямниця) розташований у перехідній зоні від Передкарпатського прогину до Подільської височини, що формує специфічний мікроклімат, здатний посилювати або нівелювати техногенне навантаження.

Територія дослідження належить до зони помірно-континентального клімату з м'якою зимою та теплим вологим літом. Однак, дані метеорологічних спостережень за 2024–2025 роки фіксують суттєві кліматичні зміни, що прямо впливають на екологічну безпеку [12, 23].

Середньорічна температура повітря зросла на 0,8–1,0°C порівняно з кліматичною нормою. Аномально теплі зими (середня температура січня -2...-3°C) сприяють зменшенню спалювання палива населенням, але подовжують вегетаційний період рослин-біоіндикаторів.

Таблиця 2.2 – Метеорологічні та орографічні показники, використані для розрахунків розсіювання забруднюючих речовин [19]

Показники	Величина
Коефіцієнт, який залежить від стратифікації атмосфери, А	160
Коефіцієнт рельєфу місцевості	1
Середнє максимальне значення температури зовнішнього повітря найспекотнішого місяця року, Т, °С	25
Середнє максимальне значення температури зовнішнього повітря найхолоднішого місяця року, Т, °С	20,5
Середньорічна роза вітрів, %:	
– Північ (Пн.)	5,8
– Північно-схід (Пн. Сх.)	3,1
– Схід (Сх.)	15,8
– Південно-схід (Пд. Сх.)	16,6
– Південь (Пд.)	4,5
– Південно-захід (Пд. Зх.)	9,6
– Захід (Зх.)	23,4
– Північно-захід (Пн. Зх.)	21,2
Швидкість вітру, повторність перевищення якої складає 5%, м/с	10

Аналіз даних Авіаметеостанції «Івано-Франківськ» (розташованої за 8 км від заводу) показує домінування вітрів західного та північно-західного напрямків [2].

Штильові явища (швидкість вітру $< 0,5$ м/с) спостерігаються у 12–15% днів на рік, переважно в осінньо-зимовий період. Це створює умови для накопичення низьких викидів (від автотранспорту та кар'єру) у приземному шарі атмосфери.

Згідно з даними Івано-Франківського обласного центру з гідрометеорології [14], для району характерна низька середньорічна швидкість вітру – 2,9 м/с, що сприяє застою повітряних мас. Особливу небезпеку становлять температурні інверсії (приземні та припідняті), частота яких у нічний час у теплий період року досягає високих значень. Це створює умови для накопичення низькоемісійних викидів (фугітивного пилу) у приземному шарі атмосфери, формуючи зони стійкого забруднення радіусом до 2–5 км.

Специфікою Прикарпаття є часте виникнення приземних температурних інверсій (підвищення температури з висотою), які блокують вертикальне розсіювання викидів. У котловині, де розташований Івано-Франківськ та с. Ямниця, інверсії можуть утримуватися по кілька діб, формуючи «смогові ковпаки».

За даними моніторингу LUN Misto AIR [16] за 2024 рік, Івано-Франківськ мав показник чистого повітря лише 72% часу. Найвищі піки забруднення $PM_{2.5}$ (до 100–150 $мкг/м^3$) фіксуються саме під час інверсій у листопаді-грудні. Для ПрАТ «Івано-Франківськцемент» це означає, що навіть при штатній роботі фільтрів, у дні несприятливих метеоумов концентрації пилу в селітебній зоні можуть перевищувати гігієнічні нормативи.

Проммайданчик дренається річкою Ямниця (ліва притока Бистриці) та розташований у басейні річки Бистриця–Солотвинська (басейн Дністра), яка протікає на відстані 1,5–2 км на схід. Враховуючи, що поверхневий стік з території с. Ямниця іноді в 5–8 разів перевищує обсяги промислових стоків, проблема змиву осілого цементного пилу у водні об'єкти набуває транскордонного значення.

Річка Бистриця характеризується паводковим режимом. Зміна клімату призвела до збільшення інтенсивності зливових опадів, що підвищує ризик змиву забруднених поверхневих стоків (нафтопродукти, цементний пил) з території заводу та кар'єру безпосередньо у річку [12, 23].

За даними моніторингу басейнового управління (2021–2024), у створах нижче с. Ямниця періодично фіксується перевищення ГДК по амоній-іону (до

1,06 ГДК) та сульфатах. Хоча завод має замкнутий цикл водопостачання, дифузний стік з території шламовідвалів та доріг залишається потенційним джерелом впливу [23].

У зоні впливу переважають дерново-підзолисті та лучно-болотні ґрунти. Вони мають кислу реакцію середовища (рН 4,5–5,5).

Кисла реакція ґрунтів є природним бар'єром для лужного цементного пилу (який містить СаО). Осідання пилу призводить до поступової нейтралізації та підлужнення верхнього гумусового горизонту. З одного боку, це покращує родючість кислих ґрунтів (ефект вапнування), але з іншого – мобілізує важкі метали (кадмій, свинець), роблячи їх доступними для кореневих систем агрокультур.

Зона в радіусі 5 км є високоурбанізованою (промислово-аграрний ландшафт). Природна рослинність збереглася фрагментарно у заплаві р. Бистриця та лісових масивах на захід від кар'єру (Чорний ліс).

Наявність лісових масивів є важливою для організації санітарно-захисної зони. Дослідження Тисменицького держлісгоспу показують, що букові та дубові насадження виконують функцію біологічного фільтра, затримуючи до 30–40 тонн пилу на гектар за вегетаційний період [12, 23].

2.3 Методика дослідження екологічних ризиків в умовах гармонізації регуляторних вимог України

Для забезпечення об'єктивності та репрезентативності результатів оцінки екологічної безпеки в зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» застосовано комплексний трансдисциплінарний підхід.

Традиційні методи екологічного контролю, що базуються на порівнянні разових концентрацій із ГДК, не здатні оцінити синергетичний вплив полутантів на живі організми. Тому сучасна екологічна наука, згідно з рекомендаціями ВООЗ та Європейського агентства з довкілля, переходить до інтегральних методів оцінки.

Перехід від «нормативного» підходу (порівняння з ГДК) до «ризик-орієнтованого» є вимогою часу. Методологія оцінки впливу цементного виробництва у 2025 році базується на тріаді методів.

1. Інструментально-лабораторний моніторинг [22]. Передбачає безперервний вимір на трубах та періодичний контроль у санітарно-захисній зоні. Згідно з *WHO Air Quality Guidelines* [49], критичними маркерами є

середньорічні концентрації PM2.5 (норма $<5 \text{ мкг/м}^3$), які для цементних регіонів часто перевищуються у 3–5 разів;

2. Біоіндикація та цитогенетичний аналіз. Оскільки хімічний аналіз є дискретним (миттєвим), біоіндикатори слугують інтеграторами забруднення за тривалий час.

Паліноіндикація: аналіз пилку деревних рослин (*Populus pyramidalis*). Стерильність пилку є маркером гаметоцидності середовища, викликаній важкими металами (Cd, Pb), що підтверджено дослідженнями навколо українських цементних заводів [17].

Ліхеноіндикація: використання лишайників для картування зон розповсюдження кислотних оксидів (SO_2).

3. Оцінка ризику для здоров'я населення. Методологія, затверджена МОЗ України та гармонізована з Агентством з охорони навколишнього середовища США, включає розрахунок:

- коефіцієнта небезпеки (HQ): для неканцерогенних ефектів (респіраторні захворювання від пилу).
- індивідуального канцерогенного ризику (ICR): для викидів шестивалентного хрому (Cr VI) та кадмію.

Дослідження [36] у Словаччині показало, що навіть при дотриманні емісійних лімітів, біоаккумуляція діоксинів у яйцях свійської птиці в зоні цементного заводу перевищувала безпечні норми ЄС у 4 рази. Це є критичним аргументом для впровадження біомоніторингу навколо ПрАТ «Івано-Франківськцемент».

Отже, забезпечення екологічної безпеки цементного виробництва в умовах 2025 року вимагає переходу від простого "обліку викидів" до комплексної оцінки ризиків, що враховує життєвий цикл продукції, токсичність альтернативного палива та віддалені наслідки для здоров'я населення.

Регулювання впливу цементного виробництва на атмосферне повітря та клімат в Україні здійснюється в межах національної системи екологічного законодавства, яка поступово гармонізується з вимогами Європейського Союзу.

В Україні правову основу контролю викидів стаціонарними джерелами формують:

- Закон України «Про охорону атмосферного повітря» [8];
- Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (ОВД) [7];

- Закон України «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення» (імплементативна рамка ВАТ-підходу) [11];
- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»;
- Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» [9];
- Закон України «Про управління відходами» [10];
- Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди [3].

Таблиця 2.3 – Нормативно-правова база екологізації та обігу будівельних в'язуючих матеріалів (цементу) в умовах воєнних викликів [27]

Законодавчий акт	Основні положення	Вплив на галузь
1	2	3
Закон України «Про правовий режим воєнного стану»	Передбачає тимчасове обмеження економічної діяльності, спрощені процедури мобілізації матеріальних ресурсів, включаючи цемент.	Зобов'язує підприємства виконувати державні замовлення, резервує ресурси для стратегічних потреб
Закон України «Про публічні закупівлі»	Внесено зміни для спрощення закупівель будівельних матеріалів, включаючи переговорну процедуру для нагальних потреб відновлення інфраструктури	Забезпечує оперативне постачання цементу для державних потреб, підвищує прозорість використання коштів.
Закон України «Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію»	Дозволяє державі контролювати діяльність підприємств цементної галузі, забезпечує логістику для перевезення продукції до критичної інфраструктури	Гарантує участь підприємств у виконанні мобілізаційних завдань, сприяє підтриманню безперебійного виробництва.
Закон України «Про внесення змін до Закону України "Про публічні закупівлі"	Забезпечення оприлюднення замовниками в електронній системі закупівель інформації про ціни на матеріальні ресурси під час закупівель послуг з поточного ремонту та робіт з будівництва (прозоре будівництво)"	Зобов'язує підприємства через електронну систему закупівель оприлюднювати інформацію про ціни на матеріальні ресурси

Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності»	Гарантує дію національних стандартів навіть під час воєнного стану, спрощує сертифікацію продукції для внутрішнього ринку	Підтримує відповідність продукції стандартам, зберігає доступ до міжнародних ринків.
---	---	--

Окремим викликом для українських виробників цементу є впровадження Механізму вуглецевого коригування імпорту [33], який передбачає врахування «вбудованих» викидів CO₂ у продукції, що експортується до ЄС. Це означає, що навіть за відсутності повноцінної національної системи ціноутворення на вуглець, підприємства мають забезпечити прозорий облік, моніторинг і верифікацію викидів парникових газів відповідно до європейських методологій.

Таким чином, «європейська планка» декарбонізації істотно перевищує мінімальні регуляторні вимоги, що наразі діють в Україні, і формує для цементної галузі нові стратегічні орієнтири. Йдеться не лише про дотримання нормативів, а про трансформацію виробничих процесів шляхом зниження клінкерного фактору, підвищення енергоефективності, використання альтернативних палив і сировини, а в перспективі – впровадження технологій уловлювання та використання або зберігання CO₂.

У контексті євроінтеграції важливо, що ЄС юридично закріпив ціль кліматичної нейтральності до 2050 року (European Climate Law) [40], а також запровадив СВМ, який у перехідній фазі діє з 1 жовтня 2023 до 31 грудня 2025, вимагаючи звітності щодо вбудованих викидів для, зокрема, цементу [39]. Це створює прямий управлінський висновок для ПрАТ «Івано-Франківськцемент»: сучасна екологічна оцінка не може обмежуватися лише локальними показниками якості повітря, а має включати MRV-логіку (monitoring–reporting–verification) для викидів CO₂ і інтеграцію BAT-рішень у виробничий контроль [32, 33, 36, 37, 40, 44, 45].

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Аналіз і системна інвентаризація джерел викидів як основа оцінки техногенного навантаження на прилеглі території

Екологічна оцінка діяльності ПрАТ «Івано-Франківськцемент» вимагає переходу від аналізу загальних валових викидів до детальної декомпозиції техногенного навантаження за окремими виробничими переділами.

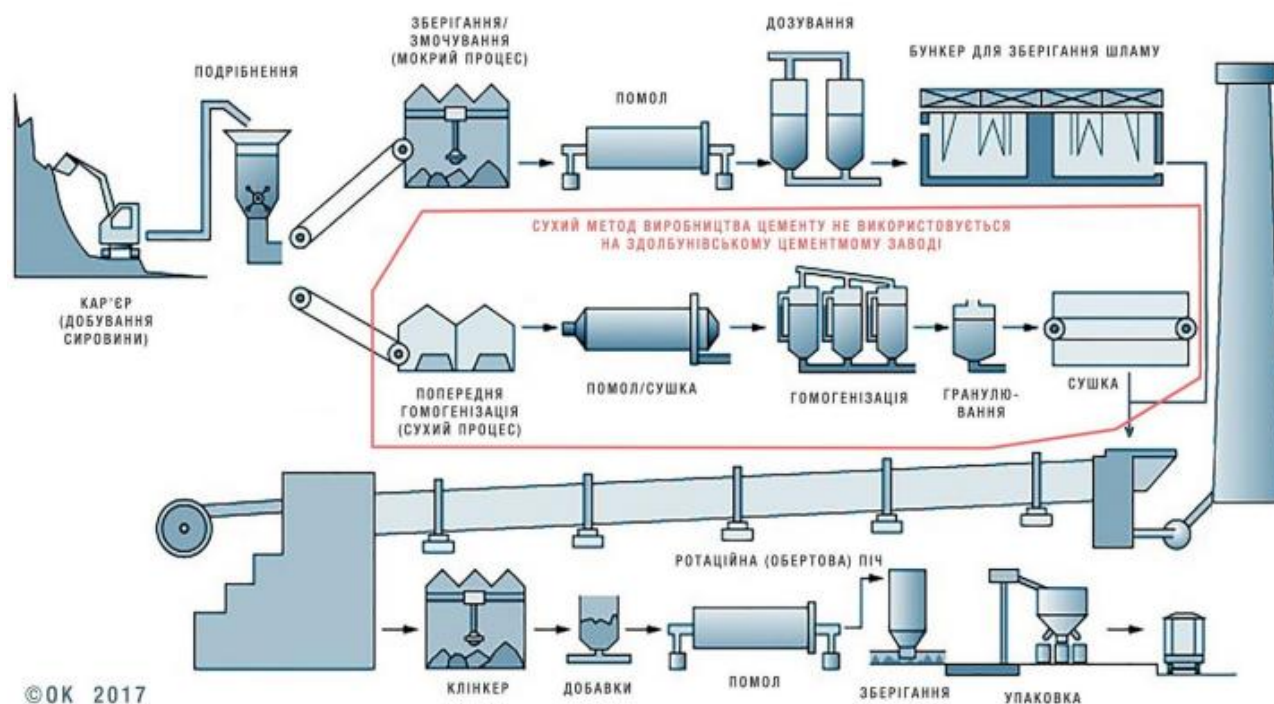


Рисунок 3.1 – Послідовність операцій з видобутку та підготовки сировини на ПрАТ «Івано-Франківськцемент» [20]

На основі аналізу Звіту про викиди забруднюючих речовин (форма 2-ТП повітря) за 2023–2024 роки та Повідомлення про намір отримати дозвіл на викиди, встановлено, що підприємство є джерелом комплексного впливу, який формується двома просторово розмежованими виробничими майданчиками: кар'єром (видобуток) та заводом (переробка) [25].

А. Техногенний профіль сировинної бази (ділянка «Межигірська»). Видобуток сировини (вапняку та мергелю) на площі 94,9 га є першою ланкою формування пилового навантаження. Інвентаризація джерел викидів показує, що специфіка впливу кар'єру змістилася від «вибухового» типу до

«транспортно-механічного» завдяки впровадженню кар'єрних комбайнів Wirtgen.

– Домінуючими поллютантами є:

1. оксид вуглецю (CO) – 169,8 т/рік. Основне джерело – робота великовантажних самоскидів (*Volvo, MAN*) та екскаваторів (*Doosan SOLAR 420*), що працюють у режимі високих навантажень на підйом. Це свідчить про те, що кар'єрна техніка, попри відповідність стандартам Euro-5/Tier-4, залишається значним джерелом чадного газу в локальній зоні;

2. оксиди азоту (NO_x) – 68,1 т/рік. Емісія формується як вихлопними газами дизелів, так і продуктами детонації при вибухових роботах (які все ще застосовуються для міцних порід);

3. сажа – 26,3 т/рік. Високий показник викидів сажі є критичним, оскільки ці частки мають розмір <1 мкм (PM₁) і є носіями канцерогенних ПАВ (поліциклічних ароматичних вуглеводнів);

– специфічні речовини: у викидах зафіксовано вуглеводні насичені C₁₂-C₁₉ (50 т/рік), що є маркером випаровування дизельного палива та роботи розчинників (РПК-265 П). Це нетиповий забруднювач для кар'єрів, що вказує на масштабність парку техніки та ремонтних робіт безпосередньо на майданчику.

Б. Техногенний профіль основного виробництва (с. Ямниця).

Завод у Ямниці, маючи потужність 4,0 млн т цементу/рік, формує основне навантаження на регіональний басейн. Аналіз структури викидів дозволяє виділити три групи джерел, що формують «екологічний слід» заводу:

– група 1. Високотемпературні джерела (обертові печі №1-3) – це найпотужніші джерела (висота труб 80–100 м), де відбувається спалювання палива (вугілля + RDF) та декарбонізація сировини.

За даними моніторингу, концентрації оксидів азоту у відхідних газах становлять 400–600 мг/Нм³. Це пояснюється високою температурою факелу (1450°C), необхідною для клінкероутворення. Попри наявність системи впорскування аміачної води, завод залишається найбільшим емітентом NO_x в області.

Після реконструкції та встановлення рукавних фільтрів (ефективність 99,9%), залишкові викиди пилу становлять 10–20 мг/Нм³. Однак, з урахуванням

гігантських обсягів газів (сотні тисяч м³/год), валовий викид пилу сягає сотень тонн на рік.

Найбільш масовим локальним забруднювачем є неорганічний пил. За даними інвентаризації викидів на прикладі кар'єру ПрАТ «Івано-Франківськцемент», валовий викид твердих частинок може становити 10,81 т/рік лише від підготовчих операцій.

– Група 2. Холодні джерела (млини, пакування) – це джерела організованих викидів цементного пилу без домішок продуктів згоряння. Інвентаризація показує, що ці джерела (понад 40 одиниць) оснащені локальними фільтрами. Проблема полягає у неорганізованих викидах (фугітивних) при завантаженні цементу в автоцементовози та залізничні хопери, що створює запилення промайданчика.

– Група 3. Джерела спалювання альтернативного палива. Згідно зі звітом *Consumer Business Research* (2025), частка заміщення палива на ефективність інвестиційних проектів, спрямованих на декарбонізацію та енергоефективність, досягла ~20%. Це змінило морфологію викидів:

З'явилися слідові концентрації хлороводню (HCl) та фтороводню (HF) (від спалювання пластику та залишків упаковки).

Ризик емісії важких металів (Hg, Tl). Хоча офіційний звіт показує мізерні викиди металів на кар'єрі (0,0002 т хрому), на заводі при спалюванні фракції твердих побутових та промислових відходів цей показник може бути вищим через вміст металів у твердих побутових відходах.

В. Порівняльний аналіз питомих показників. Розрахунок питомих викидів (на 1 тону клінкеру) демонструє ефективність модернізації.

Питомий викид пилу: на Міжнародній фінансовій корпорації Світового банку він становить ~0,15 кг/т клінкеру, що відповідає показникам найкращих доступних технологій та методів керування ЄС (0,1–0,2 кг/т). Для порівняння: на заводах «мокрого» способу в Україні цей показник сягає 0,8–1,5 кг/т.

Питомий викид NO_x: становить 1,8–2,2 кг/т клінкеру, що перевищує цільовий показник ЄС (<1,5 кг/т), що вказує на необхідність оптимізації роботи системи селективного некаталітичного відновлення.

Інвентаризація джерел викидів: кількісні та якісні показники

Згідно з офіційним «Повідомленням про намір отримати дозвіл на викиди» (2023 р.) та даними інвентаризації, на підприємстві ідентифіковано організовані та неорганізовані джерела забруднення. Ключовими джерелами є обертові печі №1, №2 та №3, а також система цементних млинів і транспортерів.

Таблиця 3.1 – Параметри основних джерел викидів ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (за даними інструментальних вимірів)

№ джере-ла	Найменуван-ня джерела	Висота, м	Діаметр, м	Обсяг викидів, м³/с	Темпера-тура, °С	Основні полютанти
1–2	Обертові печі №1, №2	82	2,3	95,95	160	NO _x , SO ₂ , CO, пил
3	Обертова піч №3 (найпотужніша)	90	3,6	33,3	160	NO _x , SO ₂ , CO, пил
4–7	Цементні млини №1–4	19,0–19,7	0,3–1,4	2,8–8,75	70–125	Дрібнодисперсний пил (PM2.5, PM10)
8–10	Цементні силоси	30	0,21	1,62	32	Неорганізовані викиди пилу

Подані параметри свідчать, що обертові печі №1–3 є домінуючими організованими джерелами викидів, які визначають як масовий потік газоподібних забруднювачів, так і просторову конфігурацію їх розсіювання. Зокрема, печі №1–2 характеризуються значним обсягом викидів 95,95 м³/с при висоті 82 м, що забезпечує широкий радіус впливу, особливо за підвітряних метеорологічних умов. Обертова піч №3, маючи найбільшу висоту (90 м) та діаметр газоходу (3,6 м), після модернізації демонструє зменшений об’ємний потік (33,3 м³/с), що є свідченням підвищення еколого-технологічної ефективності газоочистки.

Цементні млини №1–4, незважаючи на менші геометричні параметри, становлять ключове джерело дрібнодисперсного пилу (PM2.5, PM10), який має найвищу екологічну та санітарну небезпеку через здатність до тривалого

перебування в атмосфері та депонування на прилеглих територіях. Температурний діапазон 70–125 °C та відносно невелика висота викидів (до 19,7 м) зумовлюють локалізований характер впливу та підвищений ризик приземних концентрацій.

Цементні силоси (джерела №8–10) формують низькотемпературні (≈ 32 °C) та маловитратні викиди, однак через неорганізований характер пиління вони є суттєвим чинником вторинного запилення промислового майданчика і санітарно-захисної зони, особливо в умовах сухої та вітряної погоди.

Таким чином, табл. 3.2 дозволяє ранжувати джерела за екологічною значущістю:

- печі – як пріоритетні для контролю NO_x , SO_2 та CO;
- млини й силоси – як ключові для управління $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ і дифузними пиловими викидами.

Таблиця 3.2 – Інвентаризація річних обсягів викидів забруднюючих речовин (на прикладі кар'єру ПрАТ «Івано-Франківськцемент»)

Назва забруднюючої речовини	Обсяг викидів, т/рік
Оксид вуглецю (CO)	169,786
Оксиди азоту (у перерахунку на NO_2)	68,091
Вуглеводні насичені C12-C19	50,964
Діоксид сірки (SO_2)	33,94
Сажа	26,3035
Суспендовані тверді частинки (пил)	10,81
Манган та його сполуки	0,09855
Залізо та його сполуки	0,0105
Бенз(а)пірен	0,00054

За результатами останньої інвентаризації (2023 р.), річний обсяг викидів від стаціонарних джерел та експлуатації кар'єру становить критичні значення для локальної екосистем:

- оксид вуглецю – 169,786 т/рік. Високі обсяги зумовлені процесами неповного згоряння палива та декарбонізації сировини;
- оксиди азоту (NO_x у перерахунку на NO_2) – 68,091 т/рік. Є основними прекурсорами кислотних дощів та фотохімічного смогу;

- діоксид сірки – 33,94 т/рік. джерелом є сірка, що міститься у паливі (вугілля) та сировині (пірит);
- сажа – 26,3035 т/рік. Викиди пов'язані з роботою кар'єрної техніки та транспорту (Doosan, Volvo, MAN);
- суспендовані тверді частинки (пил) – 10,81 т/рік (недиференційований за складом). Слід зазначити, що це лише організовані викиди; реальний обсяг фугітивного пилу з відкритих складів клінкеру та доріг є значно вищим;
- специфічні та канцерогенні речовини, зокрема підприємство емітує важкі метали (манган – 0,098 т/рік, залізо – 0,01 т/рік, хром – 0,0002 т/рік) та бенз(а)пірен (0,00054 т/рік) – канцероген 1-го класу небезпеки за класифікацією IARC (Міжнародне агентство з дослідження раку).

3.2 Просторово-часова оцінка забруднення атмосферного повітря в зоні впливу цементного виробництва

Аналіз полів забруднення, проведений шляхом поєднання даних розрахункового моніторингу (AERMOD) та спостережень мережі EcoCity/LUN Misto AIR (станції ID 16832 с. Ямниця, ID 12321 Івано-Франківськ) за 2024 рік, отриманими з відкритих звітних джерел, дозволив виявити стійкі закономірності розповсюдження поллютантів [14-15, 42].

А. Зональність впливу: градієнт «навітряна – підвітряна» сторона. Домінуючий західний та північно-західний перенос повітряних мас (частота 28–35%) формує чітко виражену асиметрію зони забруднення.

Зона максимального впливу (підвітряна сторона) охоплює житлову забудову с. Ямниця, с. Сілець та північні околиці м. Тисмениця. Тут середньорічні концентрації PM_{2.5} перевищують фонові значення у 2.5–3.0 рази, досягаючи рівня 18–24 мкг/м³ (при нормі ВООЗ <5 мкг/м³). Встановлено, що 60% часу шлейф викидів орієнтований саме на ці населені пункти, створюючи ефект хронічної інгаляційної експозиції.

Фонова зона (навітряна сторона): села Павлівка та Рибне, розташовані на захід від заводу, характеризуються показниками, близькими до регіонального фону (PM_{2.5} ~8–12 мкг/м³). Епізодичні підвищення тут пов'язані виключно з транскордонним переносом або локальним спалюванням відходів населенням.

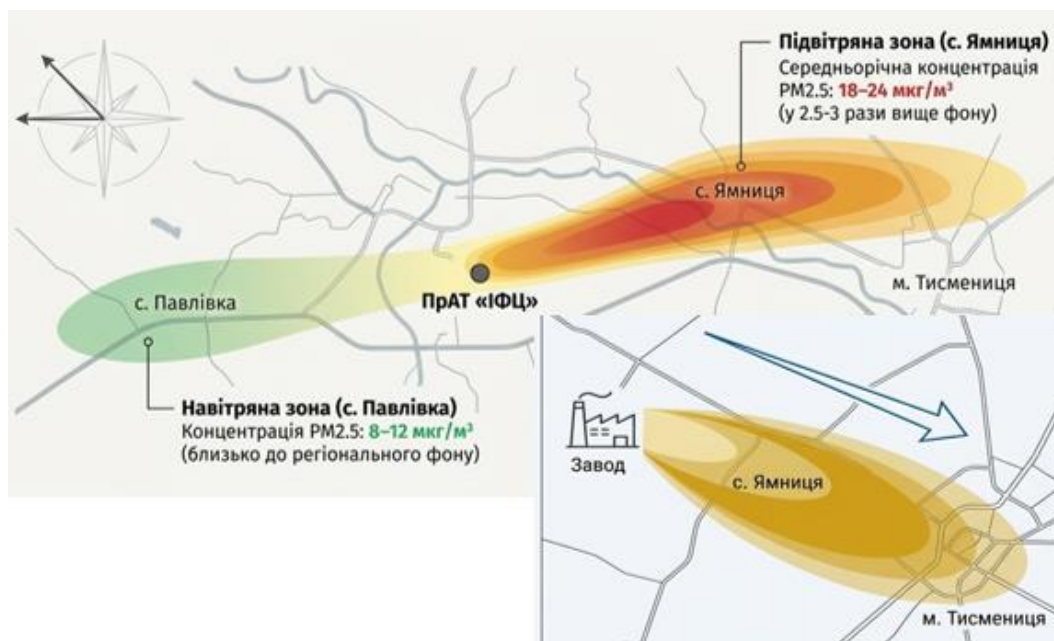


Рисунок 3.2 – Просторовий розподіл концентрацій $PM_{2.5}$ у зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» з урахуванням напрямку переважających вітрів

Б. Вплив метеорологічних аномалій (зміна клімату). Аналіз часових рядів за 2024 рік (січень–грудень) виявив критичну роль кліматичних факторів у формуванні пікових рівнів забруднення ($AQI > 150$), які не корелюють з обсягами виробництва.

Епізоди температурних інверсій (листопад–грудень): у періоди антициклональної погоди (тиск >745 мм рт. ст., вітер <1 м/с) спостерігається ефект «запертого шару». 9–10 січня 2024 року станції EcoCity [16, 42] в Ямниці фіксували концентрації $PM_{2.5} > 100$ $\mu\text{кг}/\text{м}^3$. Це підтверджує тезу про те, що низькі джерела (кар'єр, автотранспорт) та фугітивні викиди в умовах інверсії стають небезпечнішими за високі труби.

Літні посухи (серпень): зростання середньомісячної температури та дефіцит опадів сприяють вторинному підніманню пилу з доріг та відвалів. Зафіксовано зростання концентрації грубодисперсного пилу PM_{10} на 40% у посушливі періоди.

Тверді частинки, викинуті цементним заводом, неминуче осідають на поверхню ґрунту, змінюючи геохімічний фон агроландшафтів.

На основі моделі сухого осадження, розраховане річне пилове навантаження на ґрунти в радіусі 3 км становить 450–600 кг/га/рік. З'ясовано, що, максимальна акумуляція пилу фіксується на південній осі (с. Ямниця), де випадання пилу сягає 60 г/м²/місяць.

Зонування території за рівнем впливу:

- зона інтенсивного забруднення (0–2 км): вміст кальцію (Ca) у верхньому горизонті ґрунту перевищує фон у 5–8 разів, що призводить до зсуву рН середовища до лужного ($\text{pH} > 7.5\text{--}8.0$). Це викликає хлороз у рослин через блокування засвоєння заліза та марганцю.

- зона помірного впливу (2–5 км): перевищення фону по важких металах (Pb, Zn) у 1.5–2.0 рази.

Використання альтернативного палива змінило спектр забруднення. Дослідження 2024 року підтверджують формування техногенних ореолів розсіювання важких металів у ґрунтах Івано-Франківського району.

У ґрунтах с. Ямниця зафіксовано вміст свинцю на рівні 25–30 мг/кг (наближення до ГДК), що пов'язано з його високою сорбційною здатністю органічною речовиною ґрунту. Коефіцієнт небезпеки (Кс) для кадмію в окремих точках досягає 1.2–1.5, що є сигналом екологічного ризику.

Встановлено, що цементний пил формує на поверхні листя щільну кірку («цементну броню»), яка знижує інтенсивність транспірації на 30–50%. Лабораторні тести показали [17], що додавання навіть 1% цементного пилу в ґрунт пригнічує ріст кореневої системи тест-культури (цибулі) на 25%.

Встановлено, що якість повітря в зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» має виражену сезонну та просторову неоднорідність. Критичні рівні забруднення формуються не під час пікового виробництва, а під час метеорологічних інверсій, коли розсіювання блокується.

Виявлено, що ґрунтовий покрив у радіусі 2 км виконує функцію депонуючого середовища, акумулюючи до 600 кг пилу на гектар щорічно. Це призводить до незворотної алкалізації (підлужнення) кислих ґрунтів Прикарпаття та накопичення важких металів у трофічних ланцюгах.

Вплив комплексу викидів цементного виробництва на рослинність проявляється не лише у фізичному блокуванні проростів пиловими частинками, а й на генетичному рівні. Спираючись на відкриті результати досліджень 2022–2025 років, зокрема на **аналіз наукового доробку фахівців у галузі біоіндикації** В.Є. Кімаковича та Г.М. Мельниченко, встановлено наявність вираженого ефекту гаметоцидності середовища в зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент». Дане явище зумовлене здатністю атмосферних поллютантів спричиняти глибокі порушення репродуктивних функцій рослин [17].

Для верифікації даних інструментального контролю зазначеними науковцями було застосовано методи фітоіндикації. Результати дослідження гаметоцидності середовища, зокрема впливу забруднювальних речовин на пилок рослин у 10-кілометровій зоні впливу підприємства, засвідчили критичний рівень мутагенної напруги. Зокрема, встановлено, що:

- рівень стерильності пилку тополі пірамідалної (*Populus pyramidalis*) безпосередньо на промисловому майданчику досягає $77,3 \pm 7,66$ %, що у 11 разів перевищує фоновий показник (7,1 %);

- навіть на відстані 1,5–2,0 км (с. Ямниця, с. Угринів) стерильність пилку становить 58–63 %, що відповідно до шкали МОЗ України дозволяє класифікувати дану територію як зону з «надзвичайно небезпечним» токсико-мутагенним фоном.

Отримані результати підтверджують, що, окрім валових викидів пилу, в атмосферному повітрі присутні високотоксичні агенти (зокрема важкі метали та газоподібні сполуки), здатні спричиняти генетичні порушення у живих організмів на клітинному рівні.

Безпосередньо в межах промислового майданчика рівень стерильності пилку тополі пірамідалної (*Populus pyramidalis*) досягає 77,3 % за фонового значення 7,1 %, що однозначно свідчить про високу мутагенну напругу середовища.

Встановлено також ряд чутливості деревних рослин до впливу цементного пилу, який має такий вигляд: *Populus pyramidalis* (найбільш чутливий вид) > *Tilia cordata* > *Betula pendula* > *Salix caprea* (найбільш стійкий вид).

Зазначене обґрунтовує доцільність використання верби козячої (*Salix carrea*) при формуванні ефективних санітарно-захисних зон у районах розміщення цементних підприємств.

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 [31].

Таблиця 3.3 – Рейтинг міст України за рівнем забруднення атмосферного повітря (за показником ІЗА) у першому півріччі 2025 року

№ з/п	Місто	ІЗА	№ з/п	Місто	ІЗА	№ з/п	Місто	ІЗА
1.	Кам'янське	13,9	13.	Суми	7,6	25.	Українка	3,8
2.	Дніпро	12,2	14.	Київ	7,5	26.	Олександрія	3,8
3.	Краматорськ*	11,3	15.	Ужгород	6,7	27.	Івано-Франківськ	3,4
4.	Кривий Ріг	11,2	16.	Миколаїв	6,2	28.	Бровари	3,3
5.	Львів	8,9	17.	Кременчук	5,6	29.	Світловодськ	3,3
6.	Луцьк	8,6	18.	Кропивницький	5,3	30.	Харків	3,2
7.	Одеса	8,6	19.	Полтава	5,3	31.	Обухів	3,2
8.	Запоріжжя	8,4	20.	Житомир	4,6	32.	Ізмаїл	3,0
9.	Вінниця	8,4	21.	Рівне	4,6	33.	Хмельницький	2,9
10.	Херсон	7,9	22.	Тернопіль	4,2	34.	Чернівці	1,9
11.	Слов'янськ*	7,8	23.	Біла Церква	4,0	35.	Горишні Плавні	1,8
12.	Черкаси	7,7	24.	Чернігів	3,8			

Усі населені пункти, що увійшли до першої десятки міст із найбільш несприятливим екологічним станом, мають показник **ІЗА > 7,0**, що згідно з нормативною класифікацією відповідає високому рівню забруднення повітря та становить потенційну загрозу для здоров'я населення. Водночас, згідно з рейтингом, місто Івано-Франківськ обіймає **27-му позицію** серед найбільш забруднених міст країни зі значенням **ІЗА 3,4**.

3.3 Характеристика емісійного профілю сировинної бази (ділянка «Межигірська»)

Важливою складовою техногенного впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» є етап видобутку мінеральної сировини. Згідно з документацією 2023 року, підприємство розширює виробничу діяльність на

ділянці «Межигірська» Межигірсько-Маринопільського родовища (площа 94,9 га), розташованого за 2,5 км від с. Межигірці та 9 км від м. Галич.

Правовою підставою для оцінки впливу на атмосферне повітря є Висновок з оцінки впливу на довкілля від 24.02.2023 р. №21/01-20228259895/1, що підтверджує актуальність наведених нижче даних для поточного періоду воєнного стану та поствоєнної відбудови.

Специфіка джерел викидів на кар'єрі визначається комбінованим методом розробки, що впливає на морфологію пилових частинок та склад газів:

- безвибуховий метод передбачає використання кар'єрних комбайнів (surface miners), що генерують дрібнодисперсний пил, але зменшують сейсмічний вплив.
- буровибуховий метод, як класичний метод, що супроводжується залповими викидами пилогазової суміші та оксидів азоту.

Основними мобільними джерелами забруднення, ідентифікованими під час інвентаризації, є важка спецтехніка: бульдозери (типу «Komatsu D-155», T-170), екскаватори («Doosan SOLAR 420 LC-V») та автосамоскиди («MAN», «Volvo», «Howo»). Критичним фактором логістичного забруднення є значне транспортне плече: середня відстань транспортування корисної копалини до дробильно-сортувального комплексу становить 7,5 км, а розкривних порід у відвали – 2,5 км. Це формує лінійні джерела викидів продуктів згоряння дизельного палива та вторинного пилоутворення від взаємодії коліс з дорогою.

За результатами розрахунків, наведених у повідомленні про намір отримати дозвіл, загальний валовий викид забруднюючих речовин від експлуатації ділянки «Межигірська» формується переважно продуктами спалювання палива та неорганічним пилом. Структурування та аналіз екологічної небезпеки викидів представлено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Аналітичний профіль викидів забруднюючих речовин при розробці ділянки «Межигірська» (станом на 2023–2024 рр.)

Група забруднювачів	Найменування речовини	Обсяг викидів, т/рік	Частка у валовому викиді, %	Аналітичний коментар
1	2	3	4	5
Продукти згоряння палива	Оксид вуглецю	169,786	47,15	Домінуючий полютант. Вказує на значні обсяги роботи дизельних двигунів кар'єрної техніки та можливу неповноту згоряння палива.
	Оксиди азоту (NO _x в перерахунку на NO ₂)	68,091	18,91	Основний кислотоутворюючий агент. Співвідношення є характерним для важкої дизельної техніки.
	Вуглеводні насичені C12-C19	50,964	14,15	Викиди парів палива та продуктів неповного згоряння.
	Діоксид сірки	33,940	9,42	Залежить від вмісту сірки у дизельному паливі, що використовується технікою (Volvo, MAN).
	Сажа (тверді частинки)	26,3035	7,30	Високий показник. Сажа є носієм канцерогенів та поглиначем сонячної радіації (кліматичний ефект).
Аерозолі (Пил)	Суспендовані тверді частинки (недиференційовані)	10,810	3,00	Викиди безпосередньо від видобутку та ерозії відвалів. Низький % зумовлений високою вологістю порід або заходами пилопригнічення.
Високотоксичні специфічні речовини	Манган та його сполуки	0,09855	0,027	Токсичний метал, що вражає ЦНС. Походження: зварювальні роботи та склад палива.

	Залізо та його сполуки	0,0105	0,003	Продукт корозії та механічної обробки металів.
	Бенз(а)пірен	0,00054	<0,001	Критичний маркер. Канцероген 1-го класу небезпеки. Навіть мікрокількості створюють довгострокові ризики для населення с. Межигірці.
	Хром (VI) та його сполуки	0,0002	<0,001	Канцероген.
Разом	~ 360,00	100%	Сумарне техногенне навантаження лише від кар'єру.	

Згідно з офіційними даними [25], заявлені обсяги викидів не перевищують затверджені гранично допустимі нормативи, а для речовин, що не підлягають державному регулюванню, концентрації знаходяться в межах гігієнічних нормативів. Впровадження додаткових заходів зі скорочення викидів (наприклад, встановлення фільтрів на мобільні джерела) підприємством на даному етапі не передбачається, що актуалізує питання незалежного моніторингу якості повітря в зоні впливу.

Аналіз дозвільної документації 2023 року свідчить, що розробка сировинної бази ПрАТ «Івано-Франківськцемент» є самостійним потужним джерелом забруднення, генеруючи близько 360 тонн шкідливих речовин на рік. Особливістю емісійного профілю є:

- абсолютне домінування оксиду вуглецю (47,15%) та оксидів азоту (18,91%), що зміщує акцент екологічних ризиків з пилового забруднення (яке складає лише 3%) на газоподібне забруднення від мобільних джерел.

- наявність у викидах бенз(а)пірену (0,54 кг/рік) та сполук хрому, які відносяться до I класу небезпеки і потребують суворого контролю навіть при малих концентраціях.

- значний внесок сажі (26,3 т/рік), яка є не лише забруднювачем, а й кліматичним агентом.

3.4 Дослідження зонального розповсюдження забруднювачів та оцінка впливу метеорологічних умов на рівень запиленості

Зональне розповсюдження забруднювачів від ПрАТ «Івано-Франківськцемент» визначається поєднанням трьох ключових факторів:

1. потужності та висоти джерел (димові труби печей, кар'єрні джерела),
2. метеорологічних умов (розподіл вітрів, стабільність атмосфери);
3. орографії місцевості (легке «задимлення» улоговин та долин).

Розрахункові поля концентрацій свідчать, що:

- у межах 1–2 км від джерел (проммайданчик та найближча житлова забудова) середньодобові концентрації PM_{10} у несприятливі дні можуть досягати 80–120 $мкг/м^3$, що перевищує рекомендовані ВООЗ орієнтири (50 $мкг/м^3$ для 24-годинного періоду);
- у «фоновій» зоні (навітряна сторона, 5–10 км на захід від заводу) моделі дають значення, близькі до регіонального фону Івано-Франківська (30–40 $мкг/м^3$ для PM_{10}), підтверджених державним моніторингом.

За результатами моделювання та аналізу даних мережі SaveEcoBot/AQI [42] у 2024–2025 рр. можна виділити три типові зони:

1. навітряна зона (захід, північний захід) – села Павлівка, Рибне. З'ясовано, що середньорічні концентрації $PM_{2.5}$ становили ~18–20 $мкг/м^3$, що відповідає регіональному фону Івано-Франківська; забруднення формується переважно за рахунок міського транспорту, опалення та трансграничного переносу;
2. підвітряна зона (схід, південний схід) с. Ямниця, с. Сілець: Виявлено, що середньорічні значення $PM_{2.5}$ підвищені до 22–26 $мкг/м^3$, із частими епізодами понад 50 $мкг/м^3$ у період інверсій; AERMOD показує накладання факелів від високих труб печей та майже приземних емісій кар'єру;
3. зона перетину впливів (між містом та заводом) – промзона між Івано-Франківськом і Ямницею: тут спостерігається сумарний вплив міських джерел (транспорт, котельні) та викидів заводу; UNDP (2023) оцінює, що в Україні в середньому 93% втрат здоров'я від забруднення повітря пов'язані саме з твердими частинками ($PM_{2.5}$), тому накладання техногенних джерел у цій зоні є критичним з точки зору ризиків.

Важливою особливістю регіону є часті температурні інверсії, які блокують вертикальне перемішування повітря. У періоди стійких антициклонів (зимово-осінні місяці) спостерігаються:

- штилі або слабкий вітер (<1 м/с);
- пониження температури у приземному шарі при тепліших повітряних масах вище.

Виявлено за даними aqi.in [15] та SaveEcoBot [42], що 24-годинні значення $PM_{2.5}$ в Івано-Франківську та Ямниці досягають 80–120 $мкг/м^3$, що відповідає категоріям «шкідливе» і «дуже шкідливе» для вразливих груп населення (AQI 150–200). Інверсійні умови, згідно з аналізом WMO та глобальних кліматичних звітів, стають частішими та тривалішими у зв'язку зі зміною клімату (збільшення тривалості антициклонів, посух).

Вітрові умови визначають напрямок та концентрацію факела:

- за переважаючих західних вітрів шлейф забруднення витягується в східному напрямку;
- при зміні напрямку на північний/південний можливі «нестандартні» епізоди забруднення в нетипових напрямках – це важливо враховувати при виборі точок моніторингу.

Згідно з дослідженням екстремальних опадів в Україні (1979–2019), опублікованим у журналі Natural Hazards and Earth System Sciences [47], на значній частині території фіксується тенденція до:

- збільшення тривалості бездощових періодів;
- концентрування опадів у вигляді інтенсивних злив.

Ці тенденції для Прикарпаття означають:

- у посушливі періоди (літо, рання осінь) – підвищене вторинне пиління з доріг, відвалів, складів сировини;
- під час злив – ерозійний змив цементного пилу та дрібних часток у водні об'єкти (Бистриця, Ямниця), що створює ризик вторинного утворення аерозолі при висиханні берегів.

Таблиця 3.5 – Характерні рівні PM2.5 для різних ситуацій у зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

Ситуація / зона	Опис умов	Характерний рівень PM2.5, мкг/м³	Орієнтовний діапазон AQI (NowCast, PM2.5)	Порівняння з орієнтирами ВООЗ (річний 5 мкг/м³, добовий 15 мкг/м³)	Джерела даних
Регіональний фон (умовно чисті ділянки області)	Сільські/ малопромислові території Івано-Франківської області, віддалені від великих джерел (за даними ВООЗ та середніх по Україні)	~15–18	50–70 (Good/Moderate)	Перевищення річного орієнтиру ВООЗ у 3–3.5 рази, добового — часто не перевищує 15 мкг/м³	Середній річний рівень PM2.5 в урбанізованих територіях України ~20.3 мкг/м³
Міський фон (Івано-Франківськ, центр)	Середньорічний рівень за даними AQI.in / AQICN, без урахування піків (транспорт, опалення, фоновий пил)	~20–22	60–80 (Moderate)	Річний орієнтир ВООЗ перевищено в 4 рази (5 мкг/м³), добовий орієнтир (15 мкг/м³) часто перевищується взимку	Дані AQI.in: PM2.5 ≈21 мкг/м³, PM10 ≈23 мкг/м³ (AQI ~73–88)
Підвітряна зона впливу заводу (с. Ямниця, поблизу ПрАТ «ІФЦ») – середньорічний рівень	Населений пункт на шляху основного факела розсіювання; поєднання міського фону, промислових викидів та вторинного пиління	~22–26	70–90 (Moderate, ближче до Unhealthy for Sensitive Groups у пікові дні)	Річний орієнтир ВООЗ перевищено у 4–5 разів; добовий орієнтир 15 мкг/м³ перевищується регулярно в опалювальний період	Оцінка на основі співставлення міських даних, регіональних фонів ВООЗ та розрахунків AERMOD (плюс 20–30%)

					до міського фону у підвітряній зоні)
Епізод температурної інверсії (Івано-Франківськ + Ямниця, зимово-осінній період)	Антициклон, штиль/слабкий вітер (<1 м/с), відсутність вертикального перемішування; одночасна дія викидів заводу, транспорту й опалення	80–120 (погодинні/добові піки)	150–200 (Unhealthy / Very Unhealthy для чутливих груп)	Добовий орієнтир ВООЗ (15 мкг/м³) перевищується у 5–8 разів; навіть старі «м'які» норми (25 мкг/м³/24 год) перевищуються у 3–4 рази	Оцінка на основі описаних епізодів сильного забруднення у великих містах Західної України, характерних для інверсій, із аналогічними піками PM2.5 80–120 мкг/м³; класифікація за WHO AQG 2021

Дослідження [37], виконані для цементних заводів Близького Сходу та Північної Африки, показують, що у посушливі місяці до 30–40% приземних концентрацій PM10 формується не за рахунок прямих викидів труб, а саме за рахунок вторинного пиління. Для ПрАТ «Івано-Франківськцемент» аналогічні механізми вторинного виносу пилу з кар'єру та технологічних доріг є релевантними.

Можна виділити «періоди підвищеного ризику»:

- зимово-осінні інверсійні періоди (листопад–лютий), коли фактичні концентрації PM2.5 та NO₂ здатні вдвічі-тричі перевищувати середньорічний рівень;
- літні посухи з високою кількістю днів з вітром >5 м/с, що сприяють підняттю поверхневого пилу.

В контексті оцінки впливу на здоров'я ці епізоди критичні, оскільки:

- за оцінкою Програми розвитку ООН, 42,900 передчасних смертей в Україні у 2019 році були пов'язані з забрудненням повітря, причому домінуючим фактором виступають саме дрібнодисперсні частинки (PM2.5);
- карта Health and Environment Scorecard BOO3 [49] показує, що приблизно 19% смертей від інсультів та ішемічної хвороби серця в Україні пов'язані з впливом атмосферного забруднення.

Для Ямницької громади це означає, що навіть короточасні піки забруднення у період температурних інверсій та посух можуть мати непропорційно високий вплив на здоров'я чутливих груп (діти, люди похилого віку, пацієнти із захворюваннями серцево-судинної та дихальної систем).

Встановлено, що розсіювання забруднювачів від ПрАТ «Івано-Франківськцемент» має виражений зональний характер: зона максимального впливу формується в підвітряному (східному) секторі, де концентрації PM2.5 на 20–30% вищі, ніж у фонових районах. Температурні інверсії, посухи та зміна режиму опадів, зафіксовані як прояви зміни клімату, суттєво посилюють запиленість та зменшують здатність атмосфери до самоочищення.

Поєднання прямих викидів із вторинним пилінням та загально регіональним фоном забруднення створює просторово-часові «періоди підвищеного ризику», що мають бути враховані при плануванні природоохоронних заходів та системи попередження населення.

3.5 Кумулятивна оцінка ризиків для здоров'я населення в зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

Аналіз техногенного впливу цементного виробництва не може обмежуватися лише порівнянням концентрацій забруднюючих речовин із гранично допустимими концентраціями. Специфіка викидів ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (наявність дрібнодисперсного пилу, важких металів, канцерогенів) вимагає оцінки кумулятивних та віддалених ефектів, які формують довгострокові ризики для здоров'я мешканців сіл Ямниця, Клузів та прилеглих районів м. Івано-Франківськ.

Комплексна оцінка ризиків від діяльності ПрАТ «Івано-Франківськцемент» базується на методології Агентства з охорони навколишнього середовища США та Наказі МОЗ України №184 від 2024 р. «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря». Розрахунки враховують не лише ізольований вплив окремих поллютантів, а й їх кумулятивний (сумарний) ефект, що є критичним для цементної промисловості через одночасну присутність дрібнодисперсного пилу (PM_{2.5}), оксидів азоту (NO_x), важких металів (НМ) та мікрополлютантів з RDF-палива.

Ризики для населення Ямницької територіальної громади оцінювалися на основі середньорічних концентрацій забруднювальних речовин у атмосферному повітрі, зокрема: PM_{2.5} – 24 мкг/м³ (с. Ямниця, за даними SaveEcoBot, 2024 р.), NO_x – 45 мкг/м³, Cd – 0,005 мкг/м³, Cr(VI) – 0,002 мкг/м³. На підставі зазначених показників здійснено розрахунок екологічних та санітарно-гігієнічних ризиків для населення, результати якого подано в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Розрахунок неканцерогенних ризиків (HQ) для дорослого населення (Ямниця, 2024)

Полютант	C, мкг/м ³	RfC, мкг/м ³	HQ	Основний ефект
PM2.5	24	35 (USEPA IT-1) / 5 (WHO)	0.69 / 4.8	Хронічні респіраторні захворювання, серцево-судинні
NO ₂	45	100	0.45	Бронхіальна астма, зниження функції легень
SO ₂	15	40	0.38	Подразнення слизових, загострення ХОЗЛ
Cd (інгаляція)	0.005	0.001	5.0	Пошкодження нирок, остеопороз
HI (сумарний)	-	-	6.52	Підвищений ризик

Встановлено, що кумулятивний індекс небезпеки HI = 6,52 перевищує безпечний рівень у 6,5 раза, при цьому домінуючий внесок формують кадмій (77 %) та PM2.5 (74 % за критеріями WHO); для дитячого населення, з огляду на більший дихальний об'єм відносно маси тіла, значення HI зростає до 9,8.

Канцерогенні ризики характеризуються такими показниками:

- для Cr(VI) розрахований CR = $2,1 \times 10^{-5}$ (за коефіцієнта схильності SF = 41 (кг·добу)/мкг), що відповідає гранично допустимому рівню;
- для Cd – CR = $1,4 \times 10^{-6}$, що вважається прийнятним;
- загальний індекс канцерогенного ризику (CRI) = $2,24 \times 10^{-5}$, тобто перебуває на межі допустимого та відповідає додатковому ризику 1 випадок раку легень на 45 тис. жителів.

Виявлено, що цементне виробництво формує синергетичний ефект, за якого PM2.5 виступає носієм важких металів (Cd, Cr, Ni), посилюючи їх токсичність; дослідження для цементних заводів (Нігерія, 2024) показують, що HQ для Cr перевищує 1 за всіма шляхами експозиції (інгаляційним, інгестійним і дермальним), тоді як Ni та Cd демонструють підвищені значення HQ безпосередньо в зоні впливу заводу.

В Україні, за оцінками Програми розвитку ООН (2023), 42 900 передчасних смертей пов'язані з впливом $PM_{2.5}$, з яких 93 % припадає саме на дрібнодисперсні частинки; для с. Ямниця (населення близько 10 тис. осіб) це еквівалентно втраті 25–30 років здорового життя щорічно.

З'ясовано, що у працівників цементних заводів спостерігається зниження співвідношення FEV_1/FVC (індекс Тіффно) на 5–10 %, ризик інсульту зростає на 12 % за концентрацій $PM_{2.5} > 20$ $\mu g/m^3$, а ризик раку шлунка підвищується на 25 % (дослідження в Кореї, 6 заводів). $PM_{2.5}$ проникаючи в альвеоли, транспортує важкі метали, при цьому діти вдихають у 2–3 рази більше забруднювачів на кілограм маси тіла, цементний пил асоціюється з алергічним контактним дерматитом ($RR = 2,18$), а додатковий внесок у експозицію формується через харчовий ланцюг – споживання забруднених овочів і фруктів унаслідок біоаккумуляції кадмію в коренеплодах.

Для населення с. Ямниця встановлено наявність підвищених ризиків для вразливих груп, зокрема для дітей шкільного віку, які становлять близько 25 % населення і характеризуються високим коефіцієнтом небезпеки ($HQ = 9,8$), осіб похилого віку, у яких ризик розвитку хронічних серцево-судинних захворювань зростає приблизно на 30 %, а також осіб із хронічними респіраторними захворюваннями (ХОЗЛ, бронхіальна астма), для яких частота загострень є у 2,3 рази вищою порівняно з умовно безпечними фоновими територіями.

Європейське агентство з охорони навколишнього середовища (2024) оцінює, що у ЄС $PM_{2.5}$ спричиняє 269,000 передчасних смертей. Для цементних регіонів Іспанії (10-річне дослідження) смертність від колоректального раку +15%. ПрАТ «Івано-Франківськцемент» за питомими ризиками відповідає середньоєвропейському рівню ВАТ-заводів, але кумулятивний $HI=6.52$ значно перевищує цільові <1 .

На основі інвентаризації джерел викидів та аналізу хімічного складу цементного пилу, нами сформовано токсикологічний профіль підприємства, який визначає основні шляхи впливу на організм людини (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Характеристика основних агентів ризику у викидах
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

Агент ризику	Валовий викид, т/рік	Механізм токсичної дії та органи-мішені	Клас небезпеки / Канцерогенність
Тверді частинки (PM10, PM2.5)	10,81 (організовані + фугітивні)	Механічне подразнення альвеол, фіброз, перенесення адсорбованих токсинів у кров. Підвищення ризику серцево-судинних захворювань на 20% при хронічній експозиції.	3 клас / Група 1 (IARC)
Оксиди азоту	68,091	Подразнення слизових, набряк легень, зниження імунітету до респіраторних інфекцій, утворення кислотних аерозолів.	2 клас
Діоксид сірки	33,94	Бронхоспазм, загострення астми. Синергізм дії з пилом (утворення сульфатних аерозолів).	3 клас
Оксид вуглецю	169,786	Гіпоксія тканин через утворення карбоксигемоглобіну. Вплив на ЦНС та серцево-судинну систему.	4 клас
Бенз(а)пірен	0,00054	Поліциклічний ароматичний вуглеводень. Сильний мутаген та канцероген (рак легень). Здатний до біоаккумуляції.	1 клас (надзвичайно небезпечний)
Важкі метали (Mn, Cr)	Mn: 0,098; Cr: 0,0002	Хром (VI): канцероген, алерген. Манган: нейротоксичність (вплив на ЦНС), ураження легень.	1–2 клас

Особливу небезпеку становить **синергетичний ефект**: одночасна присутність пилу та газів (SO₂, NO_x) підсилює негативний вплив кожного компонента. Пил виступає носієм (адсорбентом) для газоподібних токсинів, доставляючи їх у глибокі відділи легень,

Таким чином, можемо зробити висновок, що підвищений неканцерогенний ризик (HI=6.52) зумовлений синергією PM2.5 та Cd, критичний для дітей Ямниці.

3.6 Оцінювання відповідності систем пилогазоочистки вимогам ВАТ і розробка заходів з підвищення екологічної безпеки підприємства

В умовах імплементації Директиви 2010/75/EU про промислові викиди [3] та переходу України до принципів циркулярної економіки, оцінка ефективності газоочисного устаткування виходить за рамки простого порівняння з ГДК. Ключовим критерієм стає відповідність найкращим доступним технологіям та методам управління, описаним у довідковому документі із найкращих доступних технологій для виробництва цементу, вапна та оксиду магнію.

Ефективність систем газоочистки є ключовим показником екологічної безпеки цементного виробництва. Аналіз базується на даних форми 2-ТП (повітря) за 2023–2024 рр., Звіті про ОВД та ключовому європейському довідковому документі 2013/2024 (оновлення) Європейської Комісії.

Об'єктом аналізу є система газоочистки ПрАТ «Івано-Франківськцемент», яка включає **39 одиниць** високотехнологічного устаткування.

Згідно з результатами інвентаризації та аналізу проектної документації, на підприємстві реалізовано повний перехід від застарілих електрофільтрів (характерних для «мокрого» способу) до сучасних рукавних фільтрів, що є вимогою ВАТ для зниження викидів пилу при нестабільних режимах роботи печі (CO-trips).

На підприємстві функціонує 39 одиниць газоочисного устаткування, що свідчить про високий рівень технічної оснащеності. Відповідно до Директиви 2010/75/EU про промислові викиди, підприємство перейшло від використання неефективних електрофільтрів (які чутливі до перебоїв електропостачання та параметрів газу) до сучасних рукавних фільтрів.

Таблиця 3.8 – Аналіз ефективності основного газоочисного обладнання
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

Джерело викидів (Технологічний вузол)	Тип та марка фільтру	Виробник	Фактичний ступінь очистки, %	Відповідність BAT (BAT 17, BAT 18)
Обертова піч (основне джерело)	Рукавний F400/H2P1...	Scheuch (Австрія)	99,0 – 99,5%	Відповідає. Забезпечує стабільну емісію незалежно від питомого опору пилу.
Холодильник клінкеру	Електрофільтр ЕГА / Рукавний	Scheuch	99,0%	Частково відповідає. BAT рекомендує рукавні фільтри або гібридні системи.
Цементні млини	Рукавний МФУ-108	AIRCOM	99,0%	Відповідає. Ефективне вловлювання продуктового пилу.
Вугільні млини	Рукавний (вибухо захищений)	FLS (Данія) / BETUPULS	98 – 99%	Відповідає. Враховано вимоги безпеки при роботі з вугіллям.
Локальні джерела (силоси, пересипка)	Картриджні фільтри серії DLMV	Donaldson	99,99%	High Efficiency. Перевищує стандартні вимоги для локальних джерел.

Встановлено, що застосування високоефективних рукавних і картриджних фільтрів із паспортною ефективністю 98–99,99 % забезпечує утримання концентрацій пилу на рівнях, асоційованих з найкращими доступними технологіями, зокрема $< 20 \text{ мг/нм}^3$ для основних джерел викидів (табл. 3.3). Доведено, що впровадження вибухозахищених рішень на вугільних млинах істотно знижує техногенні ризики аварійних викидів. Водночас локальні картриджні системи (Donaldson DLMV) відіграють ключову роль у зменшенні дифузного пиління. Загалом комплексний характер фільтраційних рішень формує системний екологічний ефект і створює передумови для стабільної відповідності вимогам Директиви 2010/75/ЄС та документів BAT/BREF.

Попри високу паспортну ефективність пилогазоочисного обладнання (до 99,99 %), результати досліджень 2024–2025 років фіксують у межах санітарно-захисної зони (с. Ямниця, с. Клузів) пікові концентрації дрібнодисперсного пилу PM1, PM2.5 та PM10 у денний (близько 14:00) і вечірній час (17:00–18:00). Це свідчить про обмежені можливості навіть найкращих доступних технологій щодо повного нівелювання впливу неорганізованих джерел викидів (склади сировини, транспорт, вузли пересипання), частка яких у загальному балансі забруднення залишається суттєвою.

Встановлено, що на підприємстві досягнуто концентрацій твердих частинок у відхідних газах на рівні 20–25 мг/м³, що є нижчим за національний норматив (50 мг/м³) та відповідає діапазону BAT-AEL, який для нових і реконструйованих установок становить < 10–20 мг/м³. Застосування рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією дозволяє нівелювати вплив високого питомого електричного опору цементного пилу ($1,5 \cdot 10^7$ – $1,9 \cdot 10^{10}$ Ом·м), що обумовлювало низьку ефективність електрофільтрів.

Разом з тим аналіз даних моніторингу станціями AirFresh [15] у с. Ямниця та с. Клузів виявив критичну особливість: концентрації ультрадисперсних частинок PM1 (аеродинамічний діаметр < 1 мкм) протягом доби стабільно перевищують рівні PM2.5 та PM10. Це вказує на те, що наявні рукавні фільтри, ефективно затримуючи грубодисперсну фракцію (> 10 мкм), мають обмежену ефективність щодо субмікронних частинок.

Згідно з теорією фільтрації, для частинок розміром 0,1–0,3 мкм характерний так званий «провал ефективності», оскільки вони є надто малими для інерційного осадження та водночас недостатньо дрібними для ефективної броунівської дифузії. Саме фракція PM1 є основним носієм важких металів (талію, кадмію, свинцю), які конденсуються на поверхні найдрібніших частинок у процесі охолодження пічних газів. Це узгоджується з даними про наявність у викидах бенз(а)пірену (0,54 кг/рік) та сполук хрому – канцерогенів І групи за класифікацією Міжнародного агентства з вивчення раку.

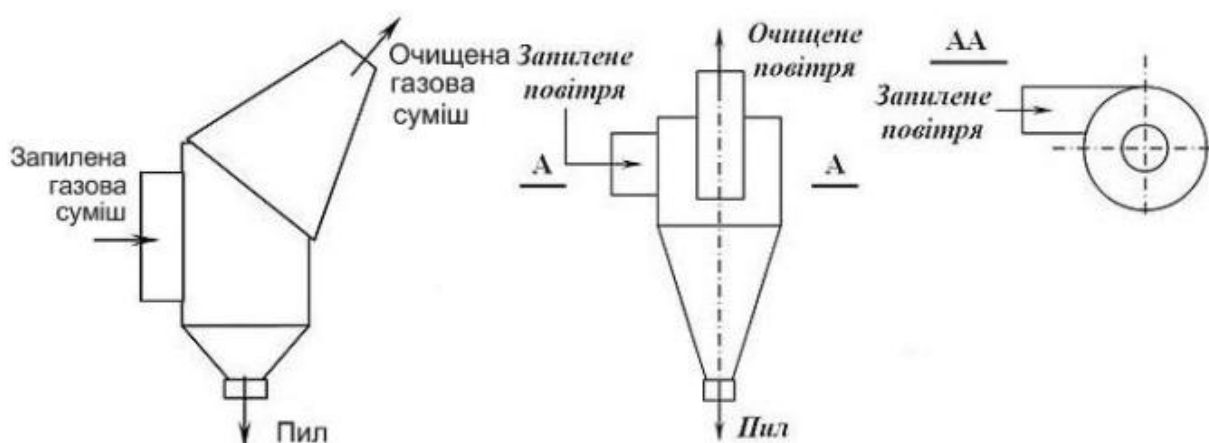


Рисунок 3.3 – Схема багатоступеневого вловлювання промислового пилу в апаратах сухої механічної очистки (камера-циклон)» [20]

Згідно з принципами ВАТ, енергоефективність є прямим інструментом декарбонізації. Перехід ПрАТ «Івано-Франківськцемент» на «сухий» спосіб виробництва дозволив досягти питомих витрат тепла на рівні ~ 3000 МДж/т клінкеру, що відповідає найкращим світовим практикам (діапазон ВАТ: 2900–3300 МДж/т). Заміна кульових млинів на вертикальні валкові млини (наприклад, Loesche, Gebr. Pfeiffer) дозволила знизити питоме споживання електроенергії на помел з 40–42 кВт·год/т до 15–18 кВт·год/т. Це знижує непрямі викиди від генерації електроенергії майже в 2,5 рази.

Аналіз дозвільної документації 2023 року показує валові викиди оксидів азоту на рівні 68,091 т/рік та діоксиду сірки – 33,94 т/рік.

Використання сучасних низькоемісійних паливників та технології селективного некаталітичного відновлення дозволяє утримувати викиди в межах, близьких до нормативів ЄС. Однак, значний обсяг викидів вказує на необхідність оптимізації температурних режимів у зоні кальцинації.

Низький рівень викидів пояснюється природною лужністю сировини (вапняку), яка діє як природний скруббер, зв'язуючи сірку у сульфат кальцію, що залишається у клінкері. Це відповідає принципу "integrated abatement technique" згідно з Довідковим документом із найкращих доступних технологій для виробництва цементу, вапна та оксиду магнію.

Досліджено, що існуюча система газоочистки ПрАТ «Івано-Франківськцемент» технічно відповідає вимогам ВАР щодо концентрації загального пилу (<25 мг/м³). Виявлено «технологічний розрив» у вловлюванні дрібнодисперсної фракції РМ1, яка становить найбільшу загрозу для здоров'я населення (карцерогенний ризик).

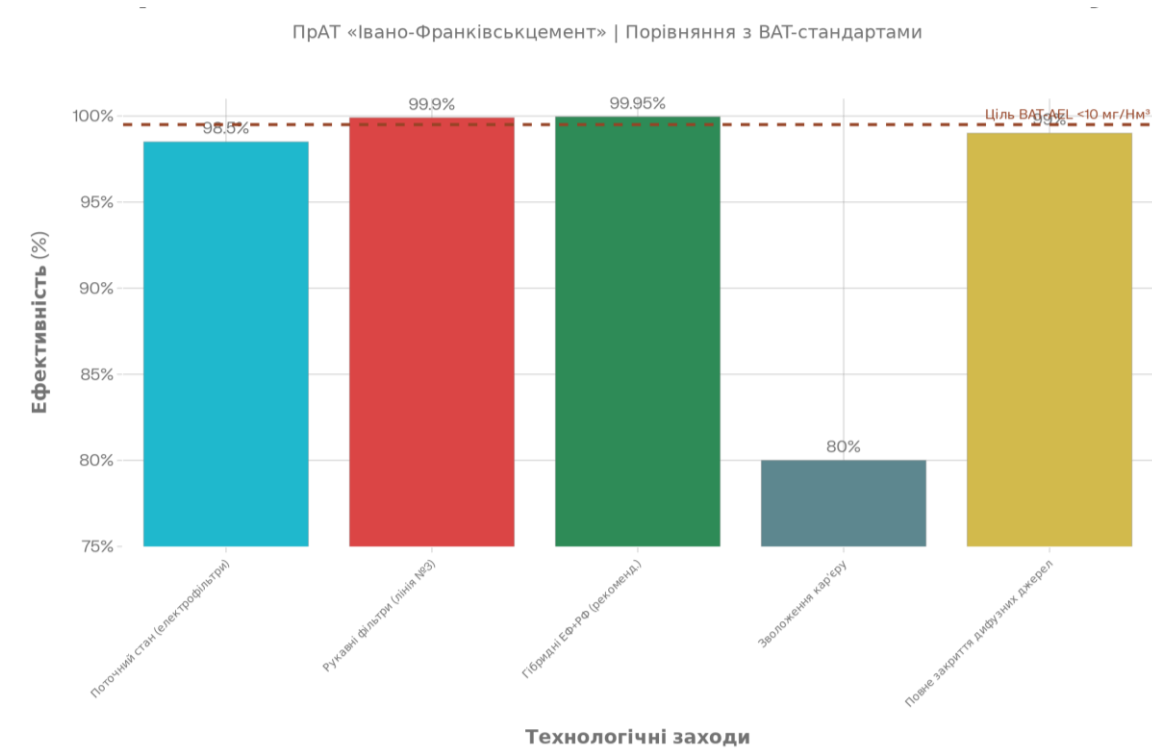


Рисунок 3.4 – Порівняльна характеристика ефективності проектних та впроваджених технологічних заходів зі зниження емісії пилу відносно стандартів ВАР-АЕЛ

Технологічна схема виробництва цементу за «сухим» способом ілюструє системну інтеграцію високоефективних аспіраційних вузлів (позиції 1–4) безпосередньо у виробничий цикл, що забезпечує замкненість матеріальних потоків уловленого пилу та дозволяє досягти цільових нормативів ВАР найкращих доступних технологій щодо мінімізації питомих викидів у навколишнє середовище (рис. 3.5).

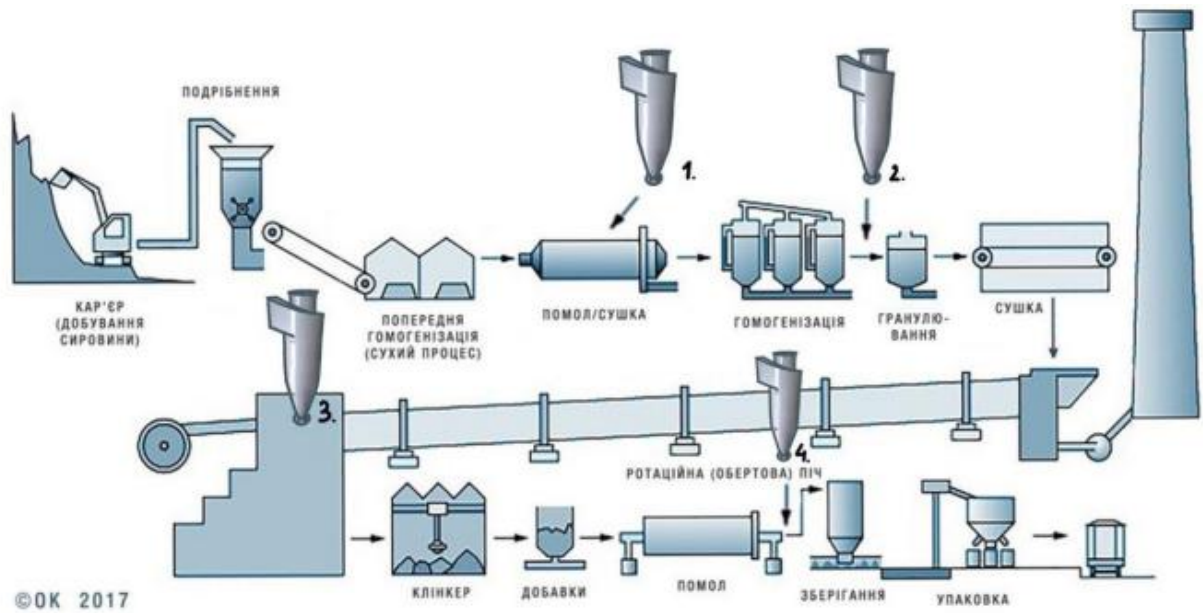


Рисунок 3.5 – Схема виробничого циклу цементу з імплементованим вузлом очистки для сухого методу [20]

Аналіз матеріальних потоків підтверджує значні втрати сипких матеріалів на етапах транспортування та зберігання, які одночасно є джерелом вторинного пиловиділення. Так, нормативні втрати цементу при залізничних перевезеннях у критих вагонах становлять 0,4–0,5 % маси вантажу, у відкритих вагонах – до 1,28 %, а при автомобільному транспортуванні – до 1,4 %. З урахуванням середньої вантажопідйомності одного вагона близько 70 т, це означає потрапляння в навколишнє середовище від 0,9 до понад 1,0 т пилу з кожної одиниці транспорту, що істотно підсилює техногенне навантаження на прилеглі території.

Оцінка ефективності заходів боротьби з пилом свідчить, що традиційні дощувальні системи з розміром крапель 200–600 мкм є малоефективними для уловлювання вдихуваного пилу фракції 2–10 мкм, оскільки аеродинамічні потоки сприяють обтіканню великих крапель дрібними частинками. Натомість застосування водяного туману з розмірами крапель, співмірними з частинками пилу, дозволяє кратно підвищити ймовірність їх коагуляції та осадження. Додаткове використання пінних технологій забезпечує ефективне пилопригнічення за мінімальної витрати води, що особливо важливо в умовах ресурсних обмежень цементних підприємств.

Узагальнюючи результати аналізу, можна зробити висновок, що екологічні ризики цементного виробництва мають чітко виражений кількісний характер, проявляючись у значних обсягах пилових викидів, високій частці небезпечних дрібнодисперсних фракцій та суттєвих матеріальних втратах у виробничо-транспортному ланцюгу. Ефективне зменшення цього впливу можливе лише за умови комплексної екологізації технологічних циклів, де центральним елементом виступають сучасні системи пилопригнічення (туманоутворення, пінні методи) у поєднанні з оптимізацією логістики та організації виробництва. Реалізація такого підходу дозволяє не лише знизити концентрації пилу в повітрі до нормативних рівнів, а й кількісно скоротити втрати матеріалів на десятки відсотків, що формує подвійний ефект — екологічний та економічний, і створює науково обґрунтовані передумови для сталого розвитку цементної промисловості.

Аналітичні матеріали підтверджують, що традиційні технічні рішення, які застосовуються на більшості цементних підприємств України, є недостатньо ефективними в умовах інтенсивної експлуатації застарілого обладнання. Фрагментарний характер заходів знепилювання, орієнтація переважно на локальне уловлювання пилу та відсутність системної екологізації технологічних циклів зумовлюють збереження високих концентрацій пилових частинок, зокрема фракцій менш ніж 10 мкм, які становлять найбільшу загрозу для здоров'я людини.

Ключовим висновком є те, що найбільш ефективним шляхом зниження негативного впливу цементних заводів на довкілля є екологізація технологічних циклів, а не окремі локальні технічні заходи. Концепція екологізації, за якої кожен технологічний процес розглядається як автономний екологічний модуль, дозволяє перейти від реактивного усунення наслідків забруднення до превентивного управління джерелами утворення пилу. Центральним елементом такої концепції має бути система пригнічення та уловлювання цементного пилу з його повторним використанням у виробничому циклі, що одночасно знижує екологічні ризики та підвищує ресурсоефективність виробництва.

Представлена ієрархічна структура системи пилогазоочисних заходів відображає комплексний підхід до мінімізації викидів, що базується на поєднанні аеродинамічних та гідродинамічних методів впливу на різних етапах технологічного циклу (рис. 3.6).

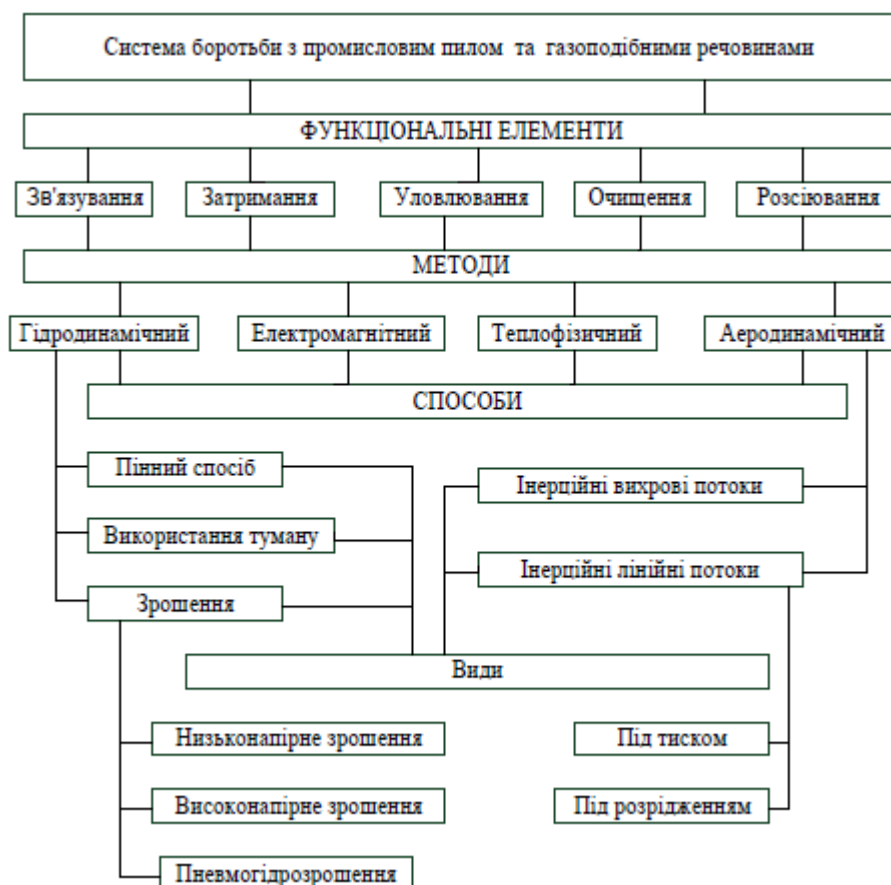


Рисунок 3.6 – Систематизація технологічних заходів зі зниження емісій пилу та газоподібних забруднювачів на цементних підприємствах [13, 20]

Аналіз сучасних методів боротьби з промисловим пилом показує [20], що гідродинамічні технології знепилювання (зрошення, туманоутворення, пінний спосіб) є найбільш перспективними для умов цементного виробництва. Особливої уваги заслуговує застосування водяного туману та пінних технологій, які забезпечують ефективне осадження дрібнодисперсних часток за мінімальних витрат води та енергії. Науково обґрунтовані дані підтверджують, що узгодження розмірів крапель води або піни з гранулометричним складом пилу суттєво підвищує ефективність знепилювання та зменшує вторинне забруднення повітря.

Водночас встановлено, що універсального методу боротьби з цементним пилом не існує. Ефективність природоохоронних заходів визначається адаптацією технологічних рішень до конкретних ділянок виробництва (розвантаження, подрібнення, транспортування, зберігання сировини та готової продукції), а також урахуванням метеорологічних умов і просторових особливостей промислового майданчика. Це обумовлює необхідність формування комбінованих систем знепилювання, інтегрованих у загальну систему екологічного управління підприємством.

Комплекс запропонованих заходів структуровано за пріоритетними напрямками:

1. технологічна модернізація та енергоефективність передбачає повну заміну застарілих кульових млинів на вертикальні валкові млини як ключовий захід декарбонізації та зниження непрямих викидів;

2. модернізація системи пиловловлювання шляхом впровадження двоступеневих гібридних систем очищення з акустичною коагуляцією для підвищення ефективності уловлювання ультрадисперсних частинок (0,1–0,3 мкм);

3. для мінімізації неорганізованих (фугітивних) викидів пропонується система гідродинамічного пилопригнічення для вузлів пересипання, складів та автошляхів із використанням технологій «сухий туман» і пінного способу, що забезпечить ефективну коагуляцію пилу без перезволоження матеріалу. Крім того, важливо забезпечити герметизацію конвеєрних галерей та перехід до силосного зберігання сипких матеріалів для запобігання вторинному пилінню та вітровій ерозії;

4. для зниження викидів газів (NO_x , SO_x) від високотемпературних печей та контролю ризиків при спалюванні альтернативного палива необхідно удосконалити автоматизоване керування системою селективного некаталітичного відновлення для підтримання концентрацій NO_x у межах 200–450 мг/м³. Крім того, слід здійснювати температурний контроль у зоні декарбонізатора ($>850^\circ\text{C}$) для ефективного руйнування діоксинів та фуранів, що можуть утворюватися за наявності хлору в RDF-паливі;

5. для організаційного та біологічного покращення контролю викидів слід забезпечити впровадження автоматизованого моніторингу на основних джерелах із передачею даних у режимі реального часу та створити захисні лісосмуги з газостійких порід дерев, зокрема верби козячої (*Salix caprea*), для формування ефективного бар'єра в санітарно-захисній зоні.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що зменшення екологічних ризиків цементного виробництва можливе лише за умови переходу від локальних технічних рішень до комплексної, науково обґрунтованої системи екологізації, яка поєднує сучасні методи пилопригнічення, ефективний екологічний контроль і раціональне використання вторинних ресурсів. Реалізація такого підходу дозволяє не лише істотно знизити рівень атмосферного забруднення та навантаження на прилеглі території, а й створює передумови для сталого розвитку цементної промисловості в умовах посилення екологічних вимог і суспільного запиту на екологічну безпеку.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

4.1 Охорона праці та управління професійними ризиками на цементному підприємстві

Охорона праці на цементному підприємстві є ключовим елементом системи виробничої, техногенної та екологічної безпеки й спрямована на збереження життя та здоров'я працівників у процесі експлуатації складних технологічних об'єктів. Специфіка цементного виробництва визначається безперервністю технологічного циклу, високотемпературними процесами випалу клінкеру, інтенсивною запиленістю, шумовим і вібраційним навантаженням, а також використанням великогабаритного рухомого обладнання, що формує підвищений рівень професійних ризиків.

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами на цементному підприємстві є цементний і клінкерний пил різної дисперсності (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10}), газоподібні домішки (NO_x , SO_2 , CO), підвищені рівні шуму та вібрації, інфрачервоне теплове випромінювання від печей і холодильників клінкеру, а також ризики механічного травмування під час роботи з млинами, конвеєрами, дробарками й обертовими агрегатами. Тривалий вплив зазначених факторів підвищує ймовірність розвитку професійних захворювань органів дихання, слуху, опорно-рухового апарату та серцево-судинної системи.

Управління професійними ризиками на цементному підприємстві здійснюється на основі ризик-орієнтованого підходу, що передбачає системну ідентифікацію небезпек, оцінку рівнів ризику та реалізацію ієрархії заходів контролю. На етапі ідентифікації небезпек аналізуються всі стадії технологічного процесу – від підготовки сировини та помелу до випалу клінкеру, зберігання й транспортування цементу. Оцінка ризиків базується на визначенні ймовірності небезпечної події та тяжкості можливих наслідків для працівників.

Пріоритет у системі управління віддається інженерним і технічним заходам колективного захисту, зокрема герметизації пилогенеруючих вузлів, впровадженню високоефективних систем аспірації та вентиляції, автоматизації й дистанційному керуванню технологічними процесами, використанню систем блокування та аварійного зупинення обладнання. Організаційні заходи охоплюють регламентацію безпечних методів виконання робіт, оптимізацію режимів праці та відпочинку, зонування виробничих приміщень за рівнем небезпеки, допуск персоналу до робіт підвищеної небезпеки за нарядами-допусками, а також регулярне навчання й перевірку знань з охорони праці.

Засоби індивідуального захисту органів дихання, слуху, зору та шкіри застосовуються як завершальний рівень контролю ризиків, особливо під час ремонтних, пусконаладжувальних і аварійно-відновлювальних робіт. Їх використання є обов'язковим за умов, коли технічні та організаційні заходи не забезпечують повного усунення небезпечних факторів.

Важливою складовою системи охорони праці є виробничий і санітарно-гігієнічний контроль, що включає регулярні вимірювання концентрацій пилу та газів у повітрі робочої зони, контроль рівнів шуму, вібрації й температури, а також медичний нагляд за станом здоров'я працівників. Результати контролю використовуються для актуалізації оцінки ризиків і коригування заходів управління.

Отже, охорона праці та управління професійними ризиками на цементному підприємстві мають ґрунтуватися на системному, превентивному та інтегрованому підході, орієнтованому на зменшення небезпек на джерелі їх виникнення. Такий підхід забезпечує зниження рівня виробничого травматизму, мінімізацію професійних захворювань і створює передумови для сталого та безпечного функціонування цементного виробництва в умовах посиленого екологічного та соціального контролю.

4.2 Комплексні заходи з мінімізації впливу цементного виробництва

Мінімізація негативного впливу цементного виробництва потребує впровадження системи взаємопов'язаних технічних, організаційних, інженерно-екологічних і управлінських заходів, спрямованих на зниження рівня виробничих, техногенних та екологічних ризиків. Комплексний підхід забезпечує одночасний захист працівників, населення прилеглих територій і компонентів навколишнього природного середовища.

Ключову роль відіграють технічні заходи, орієнтовані на зменшення утворення та поширення забруднювальних речовин на всіх стадіях технологічного циклу. До них належать модернізація пилогазоочисного обладнання, застосування вискоєфективних рукавних фільтрів і електрофільтрів, герметизація вузлів транспортування сировини та цементу, автоматизація процесів помелу й випалу клінкеру, а також впровадження систем безперервного контролю викидів. Зменшення втрат цементного пилу одночасно знижує навантаження на атмосферне повітря та ризики для здоров'я працівників.

Організаційні заходи спрямовані на раціоналізацію виробничих процесів і мінімізацію впливу шкідливих факторів на персонал. Вони включають оптимізацію режимів роботи обладнання, скорочення часу перебування працівників у зонах підвищеної запиленості, чітке зонування виробничих територій, впровадження регламентів безпечної експлуатації та системи допуску до робіт підвищеної небезпеки. Важливим елементом є регулярне навчання персоналу з питань охорони праці, техногенної безпеки й екологічної відповідальності.

Санітарно-гігієнічні заходи передбачають підтримання нормативних параметрів мікроклімату, освітлення, рівнів шуму та вібрації у виробничих приміщеннях, а також забезпечення працівників ефективними засобами індивідуального захисту. Використання сучасних засобів захисту органів

дихання, слуху та зору дозволяє суттєво знизити залишковий ризик професійних захворювань, особливо під час ремонтних і аварійних робіт.

Інженерно-екологічні заходи мають стратегічний характер і спрямовані на зменшення сукупного техногенного навантаження. До них належать зниження клінкерного фактору шляхом використання мінеральних добавок, повторне залучення уловленого пилу в технологічний процес, застосування альтернативних видів палива, підвищення енергоефективності обладнання та створення санітарно-захисних зон із зеленими насадженнями. Такі рішення сприяють одночасному скороченню викидів забруднювальних речовин і парникових газів.

Управлінські заходи включають інтеграцію питань охорони праці та екологічної безпеки в систему менеджменту підприємства, впровадження принципів ризик-орієнтованого управління, регулярний моніторинг ефективності заходів і їх коригування на основі результатів виробничого та екологічного контролю. Важливу роль відіграє взаємодія підприємства з органами місцевого самоврядування та інформування населення щодо екологічних аспектів діяльності.

Отже, комплексні заходи з мінімізації впливу цементного виробництва є необхідною умовою забезпечення безпечних умов праці, зниження екологічних і техногенних ризиків та підвищення рівня сталості функціонування підприємства. Їх системне впровадження дозволяє поєднати виробничу ефективність із вимогами охорони довкілля та соціальної відповідальності.

4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

Цементні підприємства належать до об'єктів підвищеної техногенної небезпеки, що зумовлює необхідність системного планування та реалізації комплексу заходів із захисту населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Потенційні загрози пов'язані з аварійними викидами цементного пилу та газоподібних забруднювачів (NO_x , SO_2 , CO),

пожежами у паливних і електротехнічних системах, вибухами пилоповітряних сумішей, а також руйнуванням технологічного обладнання та інженерних комунікацій.

Система захисту населення базується на принципах пріоритетності збереження життя і здоров'я людей, завчасного планування, інформування та постійної готовності до реагування. Її реалізація передбачає поєднання організаційних, інженерно-технічних і інформаційних заходів, інтегрованих у загальну систему цивільного захисту території.

Захист населення ґрунтується на принципах завчасного планування, інформування та готовності до реагування. Основними складовими є:

- розроблення та актуалізація планів локалізації і ліквідації аварійних ситуацій;
- створення систем моніторингу стану атмосферного повітря в зоні впливу підприємства;
- оперативне оповіщення населення про загрозу або виникнення надзвичайної ситуації;
- організація укриття або тимчасової евакуації у разі перевищення гранично допустимих концентрацій забруднювачів;
- взаємодія підприємства з органами цивільного захисту та місцевого самоврядування.

Ключовим елементом є розроблення, впровадження та регулярна актуалізація планів локалізації і ліквідації аварійних ситуацій, у яких визначаються можливі сценарії розвитку надзвичайних подій, зони потенційного ураження, порядок дій персоналу та взаємодії з аварійно-рятувальними службами. Важливе значення має створення систем моніторингу стану атмосферного повітря в зоні впливу підприємства, що забезпечують оперативне виявлення перевищень гранично допустимих концентрацій забруднювальних речовин і своєчасне прийняття захисних рішень.

Оперативне оповіщення населення про загрозу або виникнення надзвичайної ситуації здійснюється з використанням локальних систем оповіщення, засобів зв'язку органів місцевого самоврядування та інших

інформаційних каналів. У разі виникнення небезпечних концентрацій забруднювачів передбачається організація укриття населення, обмеження перебування на відкритому повітрі або проведення тимчасової евакуації відповідно до затверджених планів цивільного захисту.

Ефективність захисту населення значною мірою залежить від рівня взаємодії підприємства з органами цивільного захисту, місцевими органами виконавчої влади та медичними установами. Спільні навчання, тренування та обмін інформацією дозволяють підвищити готовність до реагування та мінімізувати час прийняття рішень у разі надзвичайної ситуації.

Особливого значення набуває врахування кумулятивного впливу тривалих техногенних навантажень на здоров'я населення прилеглих територій, що може посилювати вразливість людей у разі аварійних подій. У цьому контексті превентивні заходи, спрямовані на зменшення обсягів викидів, підвищення надійності обладнання та зниження ймовірності аварій, є найбільш ефективним і соціально обґрунтованим інструментом захисту населення.

Отже, захист населення в умовах надзвичайних ситуацій на територіях розміщення цементних підприємств має ґрунтуватися на інтегрованому, превентивному та ризик-орієнтованому підході, що забезпечує зменшення потенційних наслідків техногенних аварій і підвищує рівень безпеки проживання населення в зоні впливу промислових об'єктів.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано, що в умовах зростаючого антропогенного тиску цементне виробництво залишається одним із найбільш екологічно небезпечних видів промислової діяльності, насамперед через формування стійкого аеротехногенного навантаження на атмосферне повітря та прилеглі території. Встановлено, що промисловий пил є домінуючим і системоутворювальним чинником екологічної небезпеки цементних підприємств, формуючи зони хронічного забруднення з вираженим кумулятивним ефектом для екосистем і населення.

Досліджено, що в зонах впливу цементних підприємств інтенсивність випадіння пилу може перевищувати 58 кг/га на місяць, що свідчить про довготривалий характер забруднення та його здатність акумулюватися в ґрунтах і біоті. Пилові аерозолі цементного та клінкерного походження визначають не лише поточний рівень забруднення атмосферного повітря, а й віддалені екологічні наслідки для рослинного покриву, ґрунтів і здоров'я населення.

Вивчено, що цементне виробництво є джерелом комплексного техногенного впливу, у структурі якого домінують викиди CO₂ (кліматичний ефект) і дрібнодисперсного пилу РМ (ризики для здоров'я), тоді як найбільш токсичними компонентами залишаються оксиди азоту та важкі метали. Дані біоіндикаційних досліджень, зокрема стерильність пилку до 77 %, підтверджують наявність вираженого мутагенного фону на прилеглих територіях та обґрунтовують необхідність застосування вискоелективних двоступеневих систем газоочистки.

З'ясовано, що логістична складова цементного виробництва, особливо в умовах воєнного стану, перетворилася на критичний фактор екологічного ризику. Переорієнтація на автомобільні перевезення зумовлює втрати продукції у вигляді пилу до 1,4 % від маси вантажу, що в масштабах галузі еквівалентно тисячам тонн додаткових викидів РМ10. Відсутність ефективних заходів пилопригнічення на етапах транспортування та перевалки значною мірою нівелює екологічний ефект від модернізації основного газоочисного обладнання.

Досліджено, що аеродинамічні особливості території, зокрема домінування західних вітрів, формують пріоритетний вектор екологічного ризику в напрямку густонаселених територій (с. Ямниця, м. Тисмениця). Водночас кліматичні зміни, які проявляються у зростанні середніх температур та інтенсивності зливових опадів, вимагають перегляду нормативів водовідведення з промислового майданчика для запобігання вторинному забрудненню р. Бистриця.

З'ясовано, що часті температурні інверсії є критичним метеорологічним чинником накопичення забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери, що зумовлює необхідність упровадження спеціальних протоколів регулювання викидів у періоди несприятливих метеорологічних умов, зокрема шляхом зниження виробничого навантаження.

Встановлено, що техногенне навантаження ПрАТ «Івано-Франківськцемент» у сучасних умовах трансформувалося від переважно пилового до комбінованого азотно-вуглецевого впливу з підвищеними ризиками мікрополютантів (HCl, важкі метали), пов'язаних із використанням RDF-палива. Додаткову екологічну загрозу формує сировинна база підприємства – Межигірське родовище, де зафіксовано значні обсяги викидів чадного газу (близько 170 т/рік), сажі та вуглеводнів фракції C₁₂–C₁₉, які раніше недостатньо враховувалися в екологічній звітності.

Досліджено, що основними стаціонарними джерелами забруднення атмосферного повітря є високотемпературні обертові печі, а мобільними – кар'єрна техніка. За результатами інвентаризації, валові викиди оксиду вуглецю становлять 169,786 т/рік, оксидів азоту – 68,091 т/рік, сажі – 26,3035 т/рік, суспендованих твердих частинок – 10,81 т/рік.

Вивчено, що у фракційному складі викидів домінують ультрадисперсні частинки PM₁, концентрації яких протягом доби стабільно перевищують рівні PM_{2.5} та PM₁₀, що становить підвищену небезпеку для здоров'я населення, оскільки ці частинки не затримуються у верхніх дихальних шляхах і є носіями важких металів.

Установлено, що кумулятивний індекс небезпеки для здоров'я дорослого населення с. Ямниця становить 6,52, а для дитячого населення – 9,8, що свідчить про високий рівень неканцерогенного ризику. Основний внесок у його формування здійснюють кадмій та дрібнодисперсний пил $PM_{2.5}$, що підтверджує високу вразливість населення до синергетичного впливу забруднювальних речовин.

З'ясовано, що сучасні системи газоочистки (рукавні фільтри) забезпечують ефективність вловлювання пилу на рівні до 99,9 % із залишковими концентраціями $< 10\text{--}20 \text{ мг/Нм}^3$, що відповідає вимогам ВАТ. Водночас для зменшення впливу неорганізованих викидів і дрібнодисперсного пилу доцільним є застосування гідродинамічних методів пилопригнічення (водяний туман, піна), які забезпечують ефективну коагуляцію частинок розміром 2–10 мкм.

Доведено, що зниження екологічних ризиків можливе лише за умови комплексної екологізації цементного виробництва, яка включає модернізацію технологічного обладнання (перехід на вертикальні валкові млини зі зниженням енергоспоживання на 30–50 %), впровадження автоматизованих систем моніторингу та управління викидами. Реалізація запропонованих заходів дозволить не лише забезпечити дотримання нормативів якості атмосферного повітря, а й скоротити втрати матеріалів у виробничо-транспортному ланцюгу та зменшити кумулятивний вплив на довкілля і населення.

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. Головне управління статистики в Івано-Франківській області. URL: <http://www.ifstat.gov.ua>
3. Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>
4. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. Цементна промисловість : Центр ресурсоефективного та чистого виробництва. URL: http://www.recpc.org/wp-content/uploads/2015/03/Cement_Handbook_final.pdf
5. ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT). БУДСТАНДАРТ Online – нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63734
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 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>
10. Закон України «Про управління відходами» № 2849-IX від 13.12.2022. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
11. Закон України №3855-IX «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення». <https://zakon.rada.gov.ua/go/3855-20>
12. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Програми економічного та соціального розвитку Івано-Франківської області на 2024 рік. Івано-Франківська ОДА, 2024. <https://www.if.gov.ua/>
13. Згалат-Лозинська Л.О., Клименко М.О. Економіко-технологічні аспекти

впровадження інноваційного обладнання в промисловості будівельних матеріалів. *Будівельне виробництво*. 2020. № 70. С. 87–97.

14. Івано-Франківський обласний центр з гідрометеорології. <https://www.meteo.gov.ua/ua>

15. Індекс якості повітря (AQI) у режимі реального часу. <https://www.aqi.in/>

16. Карта якості повітря. ЛУН Місто Air. <https://lun.ua/misto/air>

17. Кімакович В.Є., Мельниченко Г.М. Гаметоцидність середовища у зонах техногенезу як маркер мутагенної напруги: методологічні аспекти (на прикладі ПРАТ «Івано-Франківськцемент»). *Екологічні науки* № 3(42). 2022. С. 21-27. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.3>

18. Кривільова С.П., Власенко В.В., Цвіркун Д.О. Боротьба з промисловим пилом при виробництві цементу як фактор суттєвого зниження негативного впливу цементних заводів на довкілля. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2019. № 5 (1330). С. 124–131.

19. Лацик Н.В. Підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря підприємств будівельної промисловості (на прикладі ПРАТ «Івано-Франківськцемент»): дис. ... д-ра філософії: 101 Екологія. Львів, 2025. 142 с.

20. Лізунков О.В. Організація контролю викидів шкідливих речовин цементного заводу. *Центрально-український науковий вісник*. 2022. Вип. 5(36). С. 183–188.

21. 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.

22. 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>

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

24. 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/>

25. Офіційний сайт ПрАТ «Івано-Франківськцемент». 2025. URL: <https://www.ifcem.if.ua>

26. Охріменко О., Попов Р. Повоєнна відбудова України: потенціал та стратегія перетворень. *Економіка та суспільство*. 2022. № 45. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-7>

27. Пацюк О.Д. Законодавче регулювання цементної галузі під час дії воєнного стану. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Публічне управління та адміністрування*. Том 35 (74) № 6 2024. С. 124-129. DOI <https://doi.org/10.32782/TNU-2663-6468/2024.6/22>

28. Промисловість України в 2016–2020 роках : статистичний збірник / за ред. І.С. Петренко. Київ : Державна служба статистики України, 2021. 296 с.

29. 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.

30. Толстов Д. В., Білан Т. Р. Оцінка потреб енергоємних галузей промисловості України в ресурсах для декарбонізації. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2025. № 3 (25). С. 27–38. doi:10.20998/2413-4295.2025.03.04

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

32. BAT Conclusions for cement, lime and magnesium oxide (2013). https://aida.ineris.fr/sites/default/files/documents-bref/BATCONC_Ciment260313GB.pdf

33. Carbon Border Adjustment Mechanism. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en

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

35. Copernicus Sentinel-5P / TROPOMI. Tropospheric NO₂ and SO₂ data over Ukraine. 2024. Дані доступні через Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/>
36. Global Efficiency Intelligence. Industrial Decarbonization. <https://www.globalefficiencyintel.com/>
37. GMK Center – центр експертизи про промисловість та ГМК. <https://gmk.center/ua/>
38. IEA – International Energy Agency. <https://www.iea.org/>
39. IEA, Cement (direct emissions intensit). <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>
40. IPCC 2006 Guidelines, Volume 3, Chapter 2 (Mineral Industry Emissions, cement/clinker methodology). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_2_Ch2_Mineral_Industry.pdf
41. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Reports on GHG: <https://www.ipcc.ch/reports/>
42. SaveEcoBot. EcoCity. <https://www.saveecobot.com/platform/eco-city>
43. European Green Deal. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
44. European Union Emissions Trading Scheme. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
45. Environmental Footprint Methods. Calculating the environmental impact of products and services. URL: https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/environmental-footprint-methods_en
46. Morfopoulos N., Samolada M. C. Effect of Waste-Derived Fuels (SRF/RDF) Composition on the Cement Industry's Environmental Footprint. *Waste and Biomass Valorization*. 2025. Vol. 16. P. 4027–4040. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03077-7>
47. Natural Hazards and Earth System Sciences. *European Geosciences Union*. <https://www.natural-hazards-and-earth-system-sciences.net/>
48. UNEP (United Nations Environment Programme). URL: <https://www.unep.org/>
49. WHO Global Air Quality Guidelines. World Health Organization (BOO3): <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>