

Національний університет “Львівська політехніка”

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛАЦИК НАТАЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 621.928.93

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АТМОСФЕРНОГО
ПОВІТРЯ ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ
(НА ПРИКЛАДІ ПрАТ «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКЦЕМЕНТ»)**

Спеціальність 101 - Екологія

Галузь знань 10 - Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ /Н.В. Лацик/

Науковий керівник: Петрушка Ігор Михайлович, д.т.н., професор

Львів - 2025

АНОТАЦІЯ

Лацук Н.В. Підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря підприємств будівельної промисловості (на прикладі ПрАТ Івано-Франківськцемент).

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 101 «Екологія». - Львів: Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, 2025.

Дисертація присвячена дослідженню техногенного впливу цементної промисловості на атмосферне повітря та розробці ефективних заходів для зменшення техногенного впливу.

У вступі зазначено актуальність проблеми екологічного впливу цементної промисловості, зокрема забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом, оксидами азоту, сірки та іншими шкідливими речовинами. Вказано розроблені методи і технічні рішення спрямовані на зменшення екологічного навантаження, підвищення економічної ефективності виробництва та використання тонкодисперсного пилу у виготовленні високоякісного бетону. Також зазначені мета та завдання, об'єкт та предмет дослідження.

У першому розділі розглянуто значення цементної промисловості для будівельної галузі України, а також її екологічний вплив. Ця галузь є ключовою для забезпечення капітального будівництва, використовуючи внутрішні ресурси сировини, такі як вапняк, мергель та глина. Виробництво цементу супроводжується значними викидами, зокрема цементного пилу, оксидів азоту, діоксиду сірки, вуглецю, важких металів, хлоридів і фторидів, що забруднюють атмосферу, сприяючи утворенню смогу, кислотних дощів і зниженню прозорості повітря. Основними чинниками цього впливу є зношене обладнання, недостатнє впровадження сучасних технологій очищення та недотримання екологічних стандартів. Розділ акцентує увагу на важливості модернізації виробництва, впровадження ефективних методів уловлювання забруднювачів і посилення екологічного контролю для зниження шкоди довкіллю та захисту здоров'я населення.

У другому розділі розглянуто характеристику об'єкта дослідження, природного середовища території розташування ПрАТ «Івано-Франківськцемент» та методи аналізу його техногенного впливу. Детально описано геологічні, кліматичні, гідрологічні та ґрунтові особливості місцевості, які визначають умови розсіювання забруднюючих речовин та екологічні ризики. Наведено історію розвитку підприємства, його стратегічне положення, виробничі процеси, а також основні джерела викидів, зокрема пилу, оксидів сірки, азоту та вуглецю. Описано сучасні заходи, впроваджені для зменшення шкідливого впливу, включаючи використання ефективного газоочисного обладнання, моніторинг процесів та дотримання екологічних стандартів. Розглянуто технічні й організаційні методи прогнозування зменшення впливу підприємства на повітряне середовище, що включають герметизацію виробничих процесів, впровадження сучасних фільтрів і оптимізацію технологій. Оцінено рівень забруднення атмосферного повітря твердими частинками PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀ у зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» шляхом цілодобових вимірювань у двох контрольних точках – с. Клузів та с. Ямниця. Отримані дані використано для розрахунку індексу якості повітря (AQI).

У третьому розділі досліджено вплив цементної промисловості на якість атмосферного повітря, зокрема розповсюдження дрібнодисперсного цементного пилу, та розроблено математичну модель для прогнозування його концентрацій у житлових районах. Проаналізовано основні джерела викидів, фактори, що впливають на поширення пилу, та запропоновано удосконалення пиловловлюючого обладнання, яке знижує викиди пилу на 10 - 15%. Використання моделі дозволяє ефективно оцінювати техногенне навантаження, враховувати метеорологічні умови і топографію місцевості, а також розробляти заходи для зменшення забруднення. Статистична оцінка запропонованої математичної моделі для підвищення екологічної безпеки в районах, прилеглих до цементних заводів приведена на основі методу найменших квадратів. Яка дозволяє використати регресійну модель розповсюдження цементного пилу в атмосфері. Для реальних даних до моделі можуть бути додані інші фактори

(наприклад, напрямок вітру, вологість, температура, атмосферна стабільність тощо), що дозволить точніше описати процес дифузії забруднення.

У четвертому розділі обґрунтовано рекомендації щодо моніторингу екосистем у зоні впливу ПрАТ "Івано-Франківськцемент" та модернізації пиловловлюючого обладнання для зменшення негативного впливу на довкілля. Викладено принципи системного, адаптивного та довгострокового моніторингу, зокрема інтеграцію сучасних технологій.

Запропоновано удосконалення пиловловлюючих систем із використанням комбінованих методів очищення, які забезпечують вловлювання дрібнодисперсного цементного пилу, підвищують екологічну безпеку та економічну ефективність виробництва. Описана конструкція нового обладнання дозволяє не лише зменшити обсяг викидів на 10-15%, але й отримати високоякісну тонкодисперсну фракцію для використання у виробництві бетону, що сприяє підвищенню якості продукції.

Ключові слова: цементна промисловість, дрібнодисперсний пил, забруднення атмосферного повітря, математична модель, моніторинг екосистем, пиловловлююче обладнання, природне середовище.

ABSTRACT

Latsyk N.V. "Enhancing the Environmental Safety of Atmospheric Air at Construction Industry Enterprises (case study of PJSC Ivano-Frankivskcement)".

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 - Ecology, field of knowledge 10 - Natural Sciences, Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of the technogenic impact of the cement industry on atmospheric air and the development of effective measures to mitigate its environmental impact.

The first chapter examines the significance of the cement industry for Ukraine's construction sector and its environmental impact. This industry plays a crucial role in capital construction, utilizing domestic raw materials such as limestone, marl, and clay. Cement production is accompanied by substantial emissions, including cement dust,

nitrogen oxides, sulfur dioxide, carbon dioxide, heavy metals, chlorides, and fluorides, which contribute to air pollution, smog formation, acid rain, and reduced air transparency. The main factors exacerbating this impact include outdated equipment, insufficient implementation of modern purification technologies, and non-compliance with environmental standards. The chapter highlights the need for production modernization, the introduction of efficient pollutant capture methods, and stricter environmental control to minimize environmental damage and protect public health.

The second chapter presents the characteristics of the research object, the natural environment surrounding PJSC Ivano-Frankivskcement, and the methods used to analyze its technogenic impact. It provides a detailed description of the geological, climatic, hydrological, and soil conditions of the area, which influence the dispersion of pollutants and environmental risks. The historical development, strategic location, production processes, and major sources of emissions, including dust, sulfur oxides, nitrogen oxides, and carbon compounds, are outlined. Existing measures to reduce harmful emissions are reviewed, including the use of high-efficiency gas-cleaning equipment, process monitoring, and compliance with environmental regulations. The study evaluates technical and organizational methods for predicting and mitigating the plant's impact on air quality, such as sealing production processes, implementing advanced filtration systems, and optimizing technology. The assessment of atmospheric pollution levels by particulate matter PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ in the plant's impact zone was conducted through 24-hour measurements at two monitoring points - Kluziw and Yamnytsia - with the obtained data used for calculating the Air Quality Index (AQI).

The third chapter investigates the impact of the cement industry on air quality, particularly the dispersion of fine cement dust, and develops a mathematical model for predicting dust concentrations in residential areas. The main emission sources and factors influencing dust dispersion are analyzed, and improvements to dust collection equipment are proposed, reducing dust emissions by 10 - 15%. The model enables an effective assessment of technogenic loads, considering meteorological conditions and topography, and facilitates the development of measures to reduce pollution. A

statistical evaluation of the proposed mathematical model for enhancing environmental safety in areas adjacent to cement plants is conducted using the least squares method, allowing for the application of a regression model for cement dust dispersion in the atmosphere. Additional real-world factors - such as wind direction, humidity, temperature, and atmospheric stability - can be incorporated into the model for more precise pollution diffusion predictions.

The fourth chapter provides recommendations for ecosystem monitoring in the impact zone of PJSC Ivano-Frankivskcement and the modernization of dust collection systems to minimize negative environmental impacts. The principles of systematic, adaptive, and long-term monitoring are outlined, emphasizing the integration of modern technologies. The study proposes the enhancement of dust collection systems using combined purification methods, ensuring the efficient capture of fine cement dust while improving environmental safety and economic efficiency. The design of the new equipment not only reduces emissions by 10 - 15% but also allows for the collection of high-quality fine fractions for use in concrete production, thus enhancing product quality.

Keywords: cement industry, fine particulate matter, air pollution, mathematical model, ecosystem monitoring, dust collection equipment, natural environment.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Патент на корисну модель:

1. Пиловловлююча система: Патент 155139 Україна: B01D 29/00, B01D 46/02 / І. М. Петрушка, Н. В. Лацик, М. П. Кулик. № у 2022 02724; подано 24.08.2023; опубліковано 24.01.2024; Бюлетень № 4. *Особистий внесок – розроблення моделі пиловловлюючої системи.*

Статті у наукових журналах, що входять до бази даних Scopus:

2. Latsyk, N., Petrushka I., Improvement of the system for cleaning dust gas flows using an aerodynamic insert. Journal Environmental Problems. – 2024. - 9(1), - P.59–64. (фахове видання України за спеціальністю 101 – Екологія). *Особистий внесок – розробка та вдосконалення пиловловлюючої системи, яка поєднує циклон, рукавний фільтр із механізмом періодичного струшування та збірну воронку, що дозволяє ефективно вловлювати тонкодисперсний пил, покращуючи екологічну ситуацію та підвищуючи якість виробництва цементу.*

<https://doi.org/10.23939/ep2024.01.059>

<https://science.lpnu.ua/ep/all-volumes-and-issues/volume-9-number-1-2024/improvement-system-cleaning-dust-gas-flows-using>

3. Latsyk, N., Petrushka, I. Improvement of the scheme of neutralization of dust emissions into the atmosphere. Journal of Environmental Problems. – 2024. - 9(3), - P.144–149. (фахове видання України за спеціальністю 101 – Екологія). *Особистий внесок – розробка науково-методологічних принципів екологічної безпеки атмосферного повітря, пропозиція інтегрованої системи для вловлювання пилу, вдосконалення технологій очищення газів, проведення експериментальних досліджень ефективності газоочисного обладнання та формулювання рекомендацій для зниження техногенного впливу цементного виробництва на довкілля.*

<https://doi.org/10.23939/ep2024.03.144>

<https://science.lpnu.ua/ep/all-volumes-and-issues/volume-9-number-3-2024/improvement-scheme-neutralization-dust-emissions>

Статті у наукових фахових виданнях України:

4. Лацик Н. В., Петрушка І. М. Моделювання процесу поширення дрібнодисперсного пилу в атмосфері житлових районів // Науковий вісник НЛТУ України. – 2024. – Т. 34, № 7. – С. 23–29. (фахове видання України за спеціальністю 101 – Екологія). *Особистий внесок – розробка математичної моделі поширення дрібнодисперсного цементного пилу, удосконалення пиловловлюючого обладнання для зниження викидів на 10–15 %, формулюванні практичних рекомендацій щодо зменшення техногенного впливу цементного виробництва на довкілля та здоров'я населення.*

<https://doi.org/10.36930/40340703>.

<https://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/2666>

5. Петрушка І. М., Петрушка К. І., Лацик Н. В., Мушинський В. О. Використання регресійної моделі, як статистичного інструменту прогнозування поширення цементного пилу в атмосфері // Грааль науки. – 2025. – № 49 : Proceedings of the IV Correspondence international scientific and practical conference «Science in motion: classic and modern tools and methods in scientific investigations», February 21st, 2025. – Р. 199–203. (фахове видання України за спеціальністю 051 – Економіка). *Особистий внесок - розробка регресійної моделі поширення цементного пилу в атмосфері, яка враховує метеорологічні фактори та відстань від джерела викидів, що дозволяє більш точно прогнозувати рівень забруднення та оптимізувати заходи зниження його впливу на довкілля.*

DOI 10.36074/grail-of-science.21.02.2025.023

<https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/21.02.2025/37>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Petrushka I., Latsyk N. The analysis of dynamics of emissions of some pollutants of atmospheric air from PJSC “Ivano-Frankivsk Cement” // The materials of 8-th International Joint Youth Science Forum “Litteris et Artibus” & 13-th International Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology” (Lviv, November 22-24). – 2018. – Р. 309-312.

7. Петрушка І.М., Лазик Н.В. Аналіз даних спостереження за атмосферним повітрям на заводі ПАТ “Івано-Франківськцемент” // Матеріали III міжнародної науково практичної конференції “ Прикладні науково-технічні дослідження” (Івано-Франківськ, 3-5 квітня 2019 р.). – 2019. – С.16.

8. Петрушка І.М., Лазик Н.В., Антонюк В.М. Моніторинг викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря на заводі ПАТ “Івано-Франківськцемент” // Матеріали VI міжнародної науково практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Екологія – філософія існування людства” (Київ, 17-19 квітня 2019р.). – 2019. – С.89-90.

9. Петрушка І.М., Лазик Н.В. Автоматизація технологічних процесів на прикладі розрахунку гранично допустимих викидів на ПАТ “Івано-Франківськцемент” // Комп’ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку: збірник наукових статей сьомої міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 6-8 травня 2019 р.). – 2019. – С.71-74.

10. Petrushka I., Latsyk N., Antoniuk V. Automation of the calculation oof the maximum permissible emission for pollutants according to PJSC “Ivano-Frankivskcement”// Topical issues of the development of modern science. Abstracts of the 4-th International scientific and practical conference (Sofia, December 11-13). – 2019. - P. 285-291.

11. Kulyk M., Latsyk N. Dust-collecting system based on cyclone and aerodynamic insert in the form of a hose filter with periodic shaking mechanism // Scientific collection “Interconf”: with the Proceedings of the 9-th International Scientific and Practical Conference «Scientific Research in XXI Century» (Ottawa, June 18-19, 2021). – 2021. – P. 380-384.

12. Петрушка І.М., Лазик Н.В., Кулик М.П. Комплексна техніко-екологічна оцінка процесу отримання цементу // Problems of Emergency Situation: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 19 травня 2023 р., Харків. – 2023. – С. 426-427.

13. Лазик Н, Петрушка І. Підвищення ефективності вловлювання тонкодисперсного цементного пилу при використанні двоступеневої системи

очищення // Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції “Екологія. Людина. Суспільство.” (Київ, 5 червня 2024 р.). – 2024. – С. 148-153.

14. Лацик Н.В., Петрушка І.М. Прогнозування поширення пилу в атмосфері шляхом моделювання процесу // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VIII Міжнародний конгрес (Львів, 16-18 жовтня 2024 р.). - 2024. – С.152.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	14
ВСУП.....	15
РОЗДІЛ І. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	21
1.1. Аналіз техногенного впливу підприємств цементної промисловості на навколишнє середовище.....	21
1.1.1. Цементна галузь України . Загальні відомості.....	21
1.1.2. Вплив виробництва цементу на атмосферне повітря.....	26
1.1.2.1. Викиди оксидів азоту (NO_x) у процесі виробництва цементу.....	29
1.1.2.2. Викиди діоксиду сірки (SO_2) у процесі виробництва цементу.....	31
1.1.2.3. Викиди оксиду та діоксиду вуглецю у процесі виробництва цементу.....	33
1.1.2.4. Викид металів та їх сполук у процесі виробництва цементу.....	35
1.1.2.5. Викиди газоподібних хлоридів та фторидів у цементній промисловості.....	36
1.1.3 Техногенний вплив на водне середовище у процесі виробництва цементу.....	38
1.2. Методи фіксації поширення пилового забруднення в атмосфері.....	40
1.3. Вибір методу дослідження та постановка завдання.....	43
1.3.1. Модель AERMOD. Основні принципи використання.....	43
1.3.2. Модель CALPUFF.....	46
1.3.3. Автоматизована система прийняття рішень (модель ADMS)....	48
1.3.4. Модель HYSPLIT.....	50
1.3.5. Переваги моделі AERMOD для дисертаційного дослідження...	53
Висновки до розділу 1.....	54

РОЗДІЛ II. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА ОПИС МЕТОДІВ

ДОСЛІДЖЕННЯ.....	56
2.1. Характеристика об'єкта досліджень.....	56
2.1.1. Характеристика навколишнього природного середовища району розміщення об'єкта господарської діяльності.....	56
2.1.2. Передумови заснування ПрАТ «Івано-Франківськцемент».....	61
2.2. Фактори, що впливають на кількість викидів в навколишнє середовище	64
2.3. Аналіз якості повітря.....	72
2.3.1. Пристрій AirFresh для вимірювання якості повітря.....	72
2.3.2. Результати вимірювання.....	76
2.3.3. Розрахунок індексу якості повітря (AQI) для точок спостереження у с. Клузів та с. Ямниця.....	85
Висновки до розділу 2.....	88

РОЗДІЛ III. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ ПрАТ “ІВАНО-ФРАНКІВСЬКЦЕМЕНТ” НА ПОВІТРЯНЕ СЕРЕДОВИЩЕ.....

3.1 Математичне моделювання процесів розповсюдження забруднюючих речовин у повітряних потоках.....	90
3.2. Застосування регресійної моделі як статистичного інструменту для прогнозування розповсюдження цементного пилу в атмосферному повітрі.....	100
Висновки до розділу 3.....	104

РОЗДІЛ IV. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО МОНІТОРИНГУ

ЕКОСИСТЕМ У ЗОНІ ВПЛИВУ ПрАТ “ІВАНО-ФРАНКІВСЬКЦЕМЕНТ”	106
4.1 Принципи моніторингу екосистем. Нормативна база та основні принципи моніторингу екосистем в Україні.....	106
4.2 Рекомендації щодо модернізації очисного обладнання на ПрАТ “Івано-Франківськцемент”.....	110

Висновки до розділу 4	124
ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128
ДОДАТКИ.....	140

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ГОУ - Газоочисне устаткування;

ГДК - Гранично допустима концентрація;

СЗЗ - Санітарно – захисна зона;

ПрАТ - Приватне акціонерне товариство;

ПАТ - Публічне акціонерне товариство;

ЄС - Європейський союз;

ЗТЧ - завислі тверді частинки;

ААС - атомно-абсорбційної спектрофотометрія;

К2 - крейдова система;

ДСМД - державна система моніторингу;

МОЗ - Міністерство охорони здоров'я;

ГІС - геоінформаційні системи;

Держводгосп - Державне агентство водних ресурсів України;

Міндовкілля - Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України;

МНС - Міністерство надзвичайних ситуацій;

AQI - індекс якості повітря;

EEA - European Environment Agency;

UNEP - United Nations Environment Program;

AERMOD - American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model;

AMS - American Meteorological Society;

EPA - Environmental Protection Agency;

CALPUFF - California Puff Model;

ADMS - Atmospheric Dispersion Modelling System;

HYSPLIT - Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory.

ВСТУП

Актуальність теми дисертації. Цементна промисловість є однією з ключових галузей економіки, що забезпечує матеріальну базу для будівництва інфраструктурних об'єктів і житла. Проте її діяльність супроводжується значним техногенним впливом на довкілля, зокрема забрудненням атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом, викидами оксидів азоту, сірки, вуглекислого газу та важких металів. Високий рівень забруднення в зоні впливу цементних підприємств спричиняє погіршення якості життя населення, деградацію екосистем і зниження рівня екологічної безпеки. Особливо небезпечним є дрібнодисперсний пил, який здатний проникати в альвеоли легень, завдаючи шкоди здоров'ю людини, а також впливати на інші компоненти природного середовища.

Актуальність теми зумовлена необхідністю розробки ефективних методів моніторингу екосистем, модернізації пиловловлюючого обладнання та вдосконалення математичних моделей прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. Удосконалення технологій очищення повітря не лише знижує техногенне навантаження на довкілля, але й сприяє економічній ефективності виробництва через повторне використання вловлених тонкодисперсних фракцій у виробництві високоякісного бетону. Запропоновані в дослідженні підходи відповідають сучасним екологічним стандартам та вимогам сталого розвитку, що підкреслює актуальність теми як для наукової спільноти, так і для практичної діяльності в будівельній галузі.

Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри. Робота містить результати наукових досліджень кафедри «Екологічної безпеки та природоохоронної діяльності» Національного університету «Львівська політехніка» в рамках науково-дослідної тематики: НДР ЕБПД-9 «Вплив пилового забруднення на довкілля в межах урбанізованих територій» (2024-2029 рр.).

Мета і завдання досліджень. Метою дослідження є аналіз викидів забруднюючих речовин в навколишнє середовище (атмосферне повітря) ПрАТ

“Івано-Франківськцемент”; визначення основних факторів, що впливають на кількість викидів в атмосферне повітря від ПрАТ “Івано-Франківськцемент”; математичне моделювання процесів перенесення забруднюючих речовин повітряним потоком та візуалізація результатів моделювання поширення викидів забруднюючих речовин в повітряне середовище; рекомендації щодо модернізації очисного обладнання на ПрАТ “Івано-Франківськцемент”.

Для досягнення поставленої мети необхідне розв’язання таких завдань:

- аналіз техногенного впливу підприємств цементної промисловості на навколишнє середовище;
- визначення основних факторів, що впливають на кількість викидів в навколишнє середовище від ПрАТ “Івано-Франківськцемент”;
- оцінка рівня забруднення атмосферного повітря твердими частинками PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀ у зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент»;
- математичне моделювання процесів перенесення забруднюючих речовин повітряними потоками в житловій забудові;
- удосконалення конструкції пиловловлюючого обладнання, яке забезпечує ефективне вловлювання дрібнодисперсного пилу для підвищення екологічної безпеки;
- розроблення технічного рішення, яке забезпечує одночасне зниження екологічних ризиків та підвищення економічної ефективності виробництва.

Об’єкт дослідження: процеси розповсюдження цементного пилу в атмосфері в житловій забудові.

Предмет дослідження: методи моніторингу і прогнозування розповсюдження цементного пилу та шляхи його зменшення шляхом удосконалення пиловловлюючого обладнання.

Методи дослідження :

- теоретичний аналіз та систематизація літературних джерел - для визначення екологічного впливу цементної промисловості, аналізу

сучасних методів пиловловлювання, моніторингу та математичного моделювання розповсюдження пилу;

- математичне моделювання - для розробки моделі зміни концентрацій цементного пилу в атмосферному повітрі, враховуючи чинники розсіювання, метеорологічні умови та характеристики джерел викидів;
- експериментальні дослідження - для перевірки ефективності запропонованої пиловловлюючої системи, оцінки концентрації пилу в повітрі та визначення точності математичних моделей;
- комплексний аналіз природних умов - для оцінки геологічних, кліматичних, гідрологічних та ґрунтових особливостей території впливу цементного заводу;
- технічний аналіз - для оцінки конструктивних особливостей існуючих пиловловлюючих систем, їх ефективності та можливостей модернізації;
- моніторинг екосистем - для збору даних про стан навколишнього середовища в зоні впливу ПрАТ "Івано-Франківськцемент", включаючи оцінку стану повітряного середовища та екосистем.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у подальшому розвитку та вдосконаленні теорії та практики зниження техногенного впливу цементної промисловості на атмосферне повітря, підвищення екологічної безпеки та ефективності виробництва.

У дисертаційній роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше розроблено математичну модель прогнозування розповсюдження дрібнодисперсного цементного пилу в атмосферному повітрі, яка враховує специфіку джерел викидів, метеорологічні умови, топографію місцевості та фізико-хімічні властивості пилу. Застосовано комплексний підхід до моделювання, що дозволяє ефективно оцінювати техногенне навантаження в житлових районах, прилеглих до цементних заводів;
2. Вперше розроблено статистичну нелінійну регресійну модель адекватності застосування математичної моделі поширення цементного пилу в житловій забудові на прикладі ПрАТ "Івано-Франківськцемент";

3. Удосконалено конструкцію пиловловлюючої системи, яка поєднує циклон дифузального типу, блок рукавних фільтрів з механізмом періодичного струшування пилу та акустичний випромінювач. Така система забезпечує підвищену ефективність уловлювання дрібнодисперсних частинок, що дозволяє зменшити викиди цементного пилу на 10 - 15%;
4. Запропоновано використання тонкодисперсної фракції пилу як високоякісної сировини для виробництва бетону, що підвищує економічну ефективність виробництва та забезпечує раціональне використання ресурсів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці рекомендацій для модернізації пиловловлюючого обладнання, що забезпечує зниження викидів дрібнодисперсного цементного пилу на 10–15%, зменшуючи шкідливий вплив на довкілля та покращуючи екологічну ситуацію в зоні впливу цементного виробництва. Запропоновані конструктивні рішення пиловловлюючих систем, які поєднують циклон, рукавні фільтри та акустичний коагулятор, можуть бути впроваджені на цементних підприємствах для підвищення ефективності очищення повітря. Розроблена математична модель прогнозування розповсюдження цементного пилу дозволяє оцінювати концентрації забруднювачів у житлових районах, прилеглих до промислових об'єктів, і слугує основою для розробки ефективних заходів екологічного захисту. Застосування рекомендацій щодо моніторингу екосистем сприяє створенню системи довгострокового екологічного нагляду, інтеграції сучасних технологій і залученню місцевих громад до збереження природних ресурсів. Використання тонкодисперсної фракції пилу у виробництві високоякісного цементу підвищує економічну ефективність підприємств та покращує якість будівельних матеріалів.

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, дослідження і висновки, які представлено до захисту, одержані автором особисто. Здобувачем сформовано постановку задачі, самостійно проведено комплексне дослідження екологічного впливу цементного

виробництва на довкілля, розроблено рекомендації щодо зменшення викидів дрібнодисперсного пилю, розроблено математичну модель розповсюдження цементного пилю, що враховує ключові фактори і забезпечує точність прогнозування концентрацій пилю у повітрі, та розроблено і запатентовано (у співавторстві) удосконалену конструкцію пиловловлюючої системи для підвищення екологічної безпеки та ефективності виробничих процесів.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та результати досліджень доповідались та обговорювались на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях : VIII Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» та XIII Міжнародній конференції «Молоді вчені перед викликами сучасної технології», Львів, 22 - 24 листопада 2018 р., Україна; III Міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження», Івано-Франківськ, 3 - 5 квітня 2019 р., Україна; VI Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Екологія – філософія існування людства», Київ, 17 - 19 квітня 2019 р., Україна; VII Міжнародній науково-практичній конференції “Комп’ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку ”, Київ, 6 - 8 травня 2019 р., Україна; IV International scientific and practical conference “ Topical issues of the development of modern science ”, Sofia, 11 - 13 December 2019, Bulgaria; The 9-th International Scientific and Practical Conference «Scientific Research in XXI Century», Ottawa, 18 - 19 June 2021,Canada; Міжнародній науково-практичній конференції “ Problems of Emergency Situation ”, Харків, 19 травня 2023 р., Україна; XXIV Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Людина. Суспільство», Київ, 5 червня 2024 р., Україна; VIII Міжнародному конгресі “Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування.”, Львів, 16 - 18 жовтня 2024 р., Україна.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 14 наукових праць, з них 1 патент на корисну модель, 2 статті у наукових періодичних фахових

виданнях України, 2 статті що включені до міжнародних наукометричних баз, та 9 тез доповідей.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг основного тексту складає 107 сторінок, 25 рисунків, 11 таблиць, список використаних літературних джерел з 103 найменувань на 12 сторінках, додатки на 2 сторінках.

I ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Аналіз техногенного впливу підприємств цементної промисловості на навколишнє середовище

1.1.1. Цементна галузь України . Загальні відомості.

Цементна промисловість посідає ключове місце серед галузей матеріального виробництва, адже її продукція є основою для багатьох сфер господарської діяльності. Вона забезпечує необхідні ресурси для розвитку будівельної галузі, транспортної інфраструктури, промислових об'єктів та житлово-комунального господарства. Цемент широко використовується у дорожньому будівництві, при зведенні мостів, аеропортів, портових споруд, енергетичних об'єктів, включаючи гідроелектростанції та атомні електростанції. Промисловість тісно пов'язана з розвитком капітального будівництва, яке виступає одним із найважливіших рушіїв економічного зростання та забезпечує створення нових робочих місць у будівельній сфері, логістиці, виробництві будівельних матеріалів та обслуговуючих галузях. Виробництво цементу забезпечує базові потреби інфраструктури, будівництва житлових, промислових і комунальних об'єктів, а також створює умови для модернізації та розширення існуючих споруд. Таким чином, цементна галузь є не лише невід'ємним елементом національної економіки, а й важливим фактором соціально-економічного розвитку сучасного суспільства, забезпечуючи матеріальну основу для реалізації стратегічних проєктів, спрямованих на підвищення якості життя населення та конкурентоспроможності країни в цілому [1].

Цемент - це один із найважливіших і найбільш універсальних будівельних матеріалів, який використовується для створення широкого спектра будівельних конструкцій, від фундаментів до покрівель. Його основне призначення полягає у виготовленні бетону та залізобетонних виробів, які є основою сучасного будівництва. Завдяки високій міцності та довговічності цементних розчинів, цей матеріал використовується не лише у житловому та промисловому будівництві, а й у створенні інженерних споруд — дамб, тунелів, резервуарів, транспортних розв'язок та аеродромних покриттів. Крім того, цемент застосовується для

створення спеціальних видів будівельних сумішей, зокрема гідроізоляційних розчинів та вогнетривких покриттів, які забезпечують стійкість споруд до впливу води, агресивних середовищ та високих температур. Завдяки цьому цементні матеріали широко використовуються в екстремальних умовах, включаючи підземне будівництво та гідротехнічні роботи [2].

З технічної точки зору, цемент належить до групи мінеральних матеріалів із дрібнодисперсною порошкоподібною структурою. Його ключовою властивістю є здатність вступати у хімічну реакцію з водою, внаслідок чого утворюється пластична маса, яка за певний час твердне та перетворюється на надзвичайно міцний і довговічний кам'янистий матеріал. Ця унікальна здатність робить цемент незамінним у монолітному будівництві, де вимагається створення конструкцій складної форми без додаткових швів та стиків. Завдяки цьому забезпечується висока несуча здатність та сейсмостійкість будівель, що особливо актуально для регіонів з підвищеною сейсмічною активністю. Додатково сучасні цементні суміші можуть включати спеціальні добавки, які прискорюють або сповільнюють процес твердіння, підвищують морозостійкість або забезпечують підвищену водонепроникність [3].

Цементна промисловість характеризується високою матеріаломісткістю та енергомісткістю, адже для виробництва цементу необхідні значні обсяги природної сировини та енергетичних ресурсів. Виробничі потужності цементних заводів зазвичай розташовуються поблизу родовищ основних сировинних матеріалів - карбонатних порід та глинистих сланців, що зменшує витрати на транспортування та знижує собівартість готової продукції. В Україні найбільші поклади вапняку, крейди та мергелю зосереджені на території Дніпровсько-Донецької западини, Волино-Подільської плити, у Причорноморському регіоні, Львівській області та в Криму. Така географічна концентрація ресурсів створює сприятливі умови для розвитку цементної промисловості та забезпечення внутрішніх потреб країни в будівельних матеріалах [1].

Основні запаси сировини для виробництва цементу сконцентровані у великих промислових родовищах, серед яких виділяються Амвросіївське,

Краматорське, Шебелинське, Добрянське, Здолбунівське та Гуменецьке. Виробництво клінкеру - проміжного продукту, необхідного для отримання цементу - потребує значних обсягів сировини та енергоносіїв. Для виготовлення однієї тонни клінкеру зазвичай використовується близько 1,5 тонн карбонатної сировини (вапняк, мергель, крейда) та до 0,5 тонн глинистих порід. Процес виробництва передбачає видобуток сировини, її дроблення та змішування, після чого сировинна маса піддається випалу в обертових печах за температури близько 1450°C. Отриманий клінкер подрібнюють до дрібного порошку, додаючи гіпс для контролю часу твердіння. [1].

Історія цементної промисловості в Україні бере свій початок у 1896 році, коли в місті Амвросіївка на Донбасі було введено в експлуатацію перший цементний завод. Це стало відправною точкою для формування вітчизняної цементної галузі. Вже до 1913 року в Україні функціонувало 12 заводів, які разом виробляли 269 тисяч тонн цементу на рік, що забезпечувало значну частину потреб тодішнього будівництва. У наступні десятиліття галузь стрімко розвивалася, особливо у післявоєнні роки, коли необхідно було відбудовувати зруйновані міста та промислові об'єкти. До 1995 року в Україні щорічно вироблялося 7,6 мільйона тонн цементу, що підтверджує динамічний розвиток галузі та її вагоме значення для економіки країни. Нині цементна промисловість залишається ключовим сектором, який не лише задовольняє внутрішній попит, а й активно постачає продукцію на експорт у сусідні держави. [1,2].

На сьогодні цементна промисловість України представлена Асоціацією виробників цементу «Укрцемент», яка об'єднує провідні підприємства галузі, що забезпечують значну частку загального обсягу виробництва цементу в країні. До складу Асоціації входять такі ключові виробники, які формують основу вітчизняного ринку цементу [1]:

- ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна» - підприємство з потужними виробничими комплексами, яке активно впроваджує сучасні європейські технології виробництва та орієнтується на підвищення енергоефективності та екологічної безпеки своїх процесів;

- ПАТ «Хайдельбергцемент Україна» - частина відомої міжнародної групи HeidelbergCement, що відрізняється високими стандартами якості та застосуванням інноваційних технологій контролю якості продукції на всіх етапах виробництва;

- ПАТ «Подільський цемент» - входить до складу міжнародної групи Cement Roadstone Holding (CRH), яке спеціалізується на виробництві широкого спектру цементних продуктів, адаптованих до потреб як масового, так і спеціалізованого будівництва;

- ПрАТ «Миколаївцемент» - представник групи CRH, що працює з урахуванням кращих світових практик сталого виробництва та приділяє особливу увагу зменшенню техногенного навантаження на довкілля;

- ПАТ «Цемент» - (група CRH), реалізує масштабні інфраструктурні проекти та постачає цемент для об'єктів державного та приватного секторів;

- ПрАТ «Івано-Франківськцемент» - один із найбільших вітчизняних виробників, що має замкнутий цикл виробництва та впроваджує сучасні технології переробки відходів;

- ПАТ «Євроцемент Україна» - незважаючи на складні економічні умови, продовжує інвестувати у модернізацію своїх потужностей та розширення асортименту продукції відповідно до актуальних потреб українського ринку [1].

Асоціація «Укрцемент» виконує не лише функцію координаційного центру для членів, а й активно відстоює інтереси українських виробників клінкеру та цементу на національному та міжнародному рівнях. Одним із ключових завдань Асоціації є формування авторитетної експертної позиції галузі в питаннях регулювання екологічних норм, впровадження стандартів сталого розвитку, забезпечення прозорості конкуренції на внутрішньому ринку та стимулювання інновацій у виробничих процесах. Асоціація також виступає консультативним органом у процесі формування державної політики в сфері промисловості та будівництва, демонструючи значення цементної галузі як стратегічної складової економіки України. Завдяки активній позиції «Укрцемент», національні виробники мають змогу брати участь у розробці регуляторних ініціатив, які

сприяють створенню сприятливих умов для інвестицій та модернізації галузі [1,3].

Цементна промисловість України вирізняється високою конкурентоспроможністю завдяки багатим природним ресурсам і значним покладам якісної сировини, що є ключовими для виробництва цементу. Родовища вапняку, крейди, глини та мергелю, розташовані на території України, створюють умови для стабільного забезпечення виробничих потужностей власною сировиною без необхідності імпорту з інших країн. Це суттєво підвищує рівень ресурсної незалежності цементної галузі та забезпечує виробникам значну економічну гнучкість у плануванні довгострокових програм розвитку. Завдяки незалежності від імпортової сировини українські виробники можуть ефективно управляти витратами, підтримувати стабільну цінову політику на цемент для внутрішнього ринку та швидко адаптуватися до змін у попиті.

На відміну від галузей, орієнтованих на імпорт сировини або енергоресурсів, цементне виробництво може повністю базуватися на вітчизняних ресурсах, що робить його стратегічно важливим для забезпечення економічної безпеки країни. Національні виробники здатні повністю покривати потреби українського ринку в цементі, навіть у періоди пікового попиту, наприклад, під час реалізації масштабних державних інфраструктурних програм або відновлення зруйнованих об'єктів у післякризовий період. Власна сировинна база, потужний виробничий потенціал та активна модернізація технологічного обладнання забезпечують цементній промисловості України стійкі позиції на внутрішньому ринку та створюють передумови для розширення експортних поставок, що, у свою чергу, сприяє зміцненню позицій України як важливого гравця на регіональному ринку будівельних матеріалів [3].

Динаміка виробництва цементу в Україні за період 2019–2023 років представлена на графіку (рис 1.1).

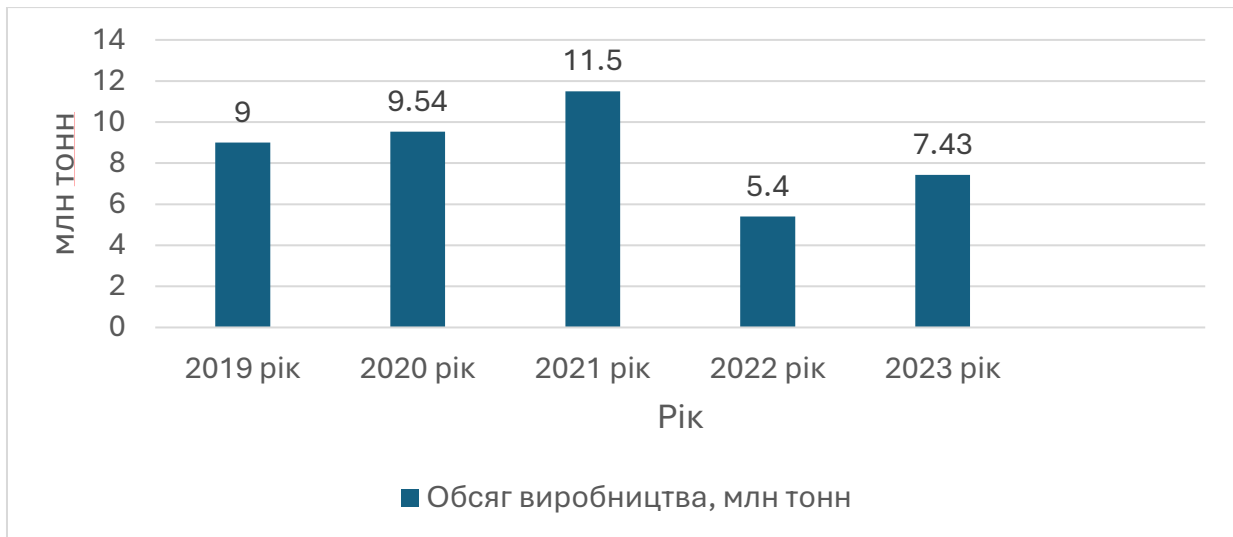


Рисунок 1.1. - Динаміка виробництва цементу в Україні за період 2019 – 2023 років

1.1.2. Вплив виробництва цементу на атмосферне повітря

На сьогоднішній день, будівництво мегаполісів, високотехнологічних промислових об'єктів та транспортної інфраструктури неможливо уявити без цементу – ключового матеріалу, який став основою будівельної галузі. Він є невід'ємною складовою будівельного процесу і одним із найбільш затребуваних матеріалів на ринку. Його універсальність та міцність зробили цемент важливим елементом для створення різноманітних інженерних споруд.

Однак, слід враховувати і екологічний вплив виробництва цементу. Заводи, де виготовляють цей матеріал, входять до переліку основних джерел забруднення повітря, які включені до так званої "чорної книги". Зростання обсягів виробництва цементу неминуче призводить до збільшення рівня пиловиділення як на території заводів, так і в прилеглих районах. Це створює значні екологічні проблеми, які потребують вирішення [4].

Основними джерелами пилоутворення на цементних заводах є різні етапи виробничого процесу. Зокрема:

- подрібнення сировини: цей етап супроводжується значним виділенням дрібнодисперсного пилу, що розповсюджується по території заводу;

- сушіння сировини: під час цього процесу у повітря потрапляють мікрочастинки, які утворюються внаслідок нагрівання та втрати вологості матеріалів;
- обпалювання сировини у печах: цей енергомісткий етап є джерелом значних викидів пилу, а також супутніх газоподібних забруднювачів;
- подрібнення та перемішування клінкеру із добавками: механічні процеси на цьому етапі сприяють утворенню великих обсягів пилу, який складно контролювати без відповідного обладнання;
- упаковка та транспортування готової продукції: процеси фасування цементу у мішки, перевезення та завантаження на транспорт також спричиняють значні пилоутворення [6].

Окрім основних виробничих етапів, джерелами пиловиділення є робота допоміжного обладнання, такого як транспортні стрічки, елеватори, вентиляційні системи та системи перевантаження матеріалів. Всі ці фактори вимагають застосування ефективних фільтраційних систем, герметизації виробничих процесів та модернізації технологій для зменшення обсягів забруднення.

Вирішення екологічних питань у цементній промисловості відіграє ключову роль у забезпеченні сталого розвитку. Мінімізація негативного впливу на довкілля сприяє збереженню природних ресурсів, а також позитивно позначається на екологічній ситуації в промислових районах. Це, своєю чергою, сприяє покращенню умов життя місцевого населення та створенню більш безпечного середовища для майбутніх поколінь [4].

Значний рівень пилоутворення у цементній промисловості [5] України спричинений декількома факторами:

- технологічними етапами виготовлення цементу;
- експлуатація застарілого обладнання;
- недостатня увага до екологічних стандартів та недостатність впровадження сучасних технологій очищення повітря;
- недосконале управління процесами виробництва та відсутність ефективних контрольних механізмів.

Процес виробництва цементу супроводжується викидами різноманітних забруднюючих речовин у повітря. До них належать як тверді частинки, так і газоподібні сполуки, які створюють ризики для екології та здоров'я людини. Серед основних забруднювачів можна виділити: цементний пил (дрібнодисперсні частинки, які поширюються у повітрі внаслідок технологічних процесів подрібнення, транспортування та перемішування матеріалів); ртуть (важкий метал, викиди якого можуть виникати під час обпалювання сировини, особливо у разі використання певних видів вапняку); сажа (тверді частинки, що утворюються під час спалювання палива для нагрівання печей); сірчистий ангідрид SO_2 (газоподібний забруднювач, що виділяється під час спалювання палива з високим вмістом сірки); оксиди азоту NO_x (утворюються внаслідок високотемпературних процесів у печах і є одним із головних джерел кислотних дощів); різні вуглеводи (леткі органічні сполуки, які можуть випаровуватися під час технологічних процесів); мікроелементи, такі як марганець і ванадій (присутні у мінеральній сировині чи паливі і виділяються у вигляді летких сполук) [5].

Промислові викиди погіршують стан атмосферного повітря, спричиняючи смог, кислотні опади та знижуючи рівень прозорості атмосфери. Зважені у повітрі частинки утворюють різноманітні аерозолі, які значно погіршують стан повітряного середовища. Одним із наслідків цього є зниження проникнення прямого сонячного випромінювання в міських районах, що може скорочувати його інтенсивність на 18-20%, впливаючи на освітленість та тепловий баланс урбанізованих територій[6].

Процеси фотохімічних реакцій, що відбуваються між оксидами азоту та вуглеводнями, сприяють утворенню нових рідких органічних сполук. Ці речовини існують у формі дрібних крапель, які розсіюються у повітрі, утворюючи аерозолі. Такі аерозолі не лише впливають на прозорість атмосфери, але й взаємодіють із іншими атмосферними компонентами, спричиняючи зміни в погодних умовах [5,6].

Окрему роль у цьому процесі відіграє висока концентрація ядер конденсації, тобто сторонніх часток, що слугують основою для формування крапель води. У місцях із великою кількістю таких часток відбувається посилене утворення хмар, що може призводити до збільшення частоти опадів і туманів. Підвищена хмарність, своєю чергою, впливає на кліматичні умови регіону, зокрема зменшує проникнення сонячної радіації та змінює тепловий баланс атмосфери.

Таким чином, наявність у повітрі не лише водяної пари, але й інших рідких речовин, які утворюються внаслідок природних і антропогенних процесів, значною мірою впливає на формування хмарності, погодних явищ та загальний стан атмосфери. Ці процеси потребують подальшого дослідження для розробки ефективних методів контролю та зменшення впливу забруднювачів на клімат [6].

1.1.2.1. Викиди оксидів азоту (NO_x) у процесі виробництва цементу

Процес випалу клінкеру є ключовим етапом у виробництві цементу, який супроводжується високими температурами, що досягають 1450–1500°C. Саме під час цього технологічного процесу відбувається інтенсивне утворення оксидів азоту (NO_x), які є одними з основних забруднювачів, що викидаються цементними заводами в атмосферу. Формування цих оксидів пов'язане з хімічною взаємодією азоту, присутнього у складі палива або в атмосферному повітрі, із киснем за умов високих температур у зоні горіння [7].

Оксиди азоту (NO_x) утворюються у двох основних формах: теплові та паливні. Теплові NO_x виникають унаслідок хімічної реакції між атмосферним азотом (N_2) і киснем (O_2) під впливом високих температур, що характерно для процесу горіння в полум'ї печі. Цей термодинамічно обумовлений процес посилюється зі зростанням температури та збільшенням часу перебування газів у зоні горіння. Такі оксиди азоту є типовими для всіх високотемпературних промислових процесів, зокрема у цементній промисловості.

Паливні NO_x утворюються під час спалювання палива, яке містить хімічно зв'язаний азот. У зоні горіння азот, присутній у складі органічних сполук палива, реагує з киснем повітря, формуючи оксиди азоту. Інтенсивність утворення цього

типу NO_x залежить від складу та властивостей палива, зокрема від концентрації азоту в ньому. Обидва механізми є важливими джерелами утворення NO_x у процесах, пов'язаних із виробництвом цементу [7,8].

Обидва механізми можуть діяти одночасно, залежно від типу палива, температурного режиму та конструктивних особливостей печі.

З огляду на значний негативний вплив оксидів азоту на навколишнє середовище, зокрема їхню участь у формуванні кислотних дощів та фотохімічного смогу, багато країн встановили законодавчі обмеження на концентрацію NO_x у викидах промислових підприємств. У країнах Європейського Союзу нормативи викидів NO_x для цементних печей встановлюються залежно від технології виробництва: для печей сухого способу виробництва з використанням циклонних теплообмінників концентрація NO_x обмежується на рівні 200–450 мг/м³; для довгих печей мокрого способу виробництва, які характеризуються вищими енергетичними витратами та меншою ефективністю теплообміну, дозволена концентрація є вищою – 400 - 800 мг/м³ [8,9].

Оксиди азоту є одними з основних чинників, що сприяють забрудненню атмосфери. Вони беруть участь у фотохімічних реакціях, утворюючи тропосферний озон, який негативно впливає на здоров'я людини та рослинність. Крім того, NO_x взаємодіють із водяною парою, утворюючи азотну кислоту (HNO_3), що є причиною кислотних дощів, які шкодять ґрунтам, водоймам і будівельним матеріалам [9].

З метою зниження викидів оксидів азоту на цементних заводах впроваджують сучасні технології, серед яких: оптимізація процесу горіння (регулювання температури та збагачення повітря для мінімізації утворення теплових NO_x); використання альтернативного палива (зниження вмісту азоту в паливі, що сприяє зменшенню паливних NO_x); каталітичне та некаталітичне відновлення NO_x (застосування спеціальних систем очищення димових газів, таких як селективне некаталітичне відновлення або селективне каталітичне відновлення)[8].

Таким чином, викиди оксидів азоту в цементній промисловості залишаються значущою екологічною проблемою, що вимагає постійного моніторингу та застосування сучасних технологій для їх мінімізації. Виконання нормативних вимог та впровадження ефективних технологічних рішень є важливими кроками на шляху до зменшення впливу цементних заводів на навколишнє середовище.

1.1.2.2. Викиди діоксиду сірки (SO_2) у процесі виробництва цементу

Рівень викидів діоксиду сірки (SO_2) на цементних заводах визначається такими факторами, як вміст сірки в паливі та сировині, концентрація сульфатних сполук і технологія виробництва. Головним джерелом SO_2 є летка сірка, що циркулює в печі під час випалу клінкеру.

Сірка може вивільнятися у різних формах: у вигляді діоксиду сірки (SO_2) у вихідних газах, у складі сульфатних сполук, таких як $CaSO_4$, у клінкері, пилу або інших елементах системи. При цьому значна її частина зберігається у клінкері або видаляється з процесу у формі стабільних сполук. [8].

Гіпс, що додається на стадії помелу цементу, може бути представлений у формах напівводного ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) або двоводного ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) сульфату кальцію. Його вибір і властивості впливають на загальну кількість сірки в готовому продукті [10].

Сировинні матеріали, залежно від родовища, можуть містити сірку у формі сульфатів і сульфідів, які по-різному впливають на утворення діоксиду сірки.

Сульфати є стабільними сполуками, що лише частково розкладаються при високих температурах у зоні спікання обертової печі. Їхнє розкладання може посилюватися за наявності локального відновлювального середовища, спричиненого процесами горіння палива або відходів. Проте більша частина сірки у складі сульфатів залишається у клінкері, практично не впливаючи на рівень викидів. [9].

Сульфіди – це сполуки, що окислюються на більш ранніх стадіях, зокрема у теплообміннику. Цей процес супроводжується частковим утворенням діоксиду сірки, який потрапляє у вихідні гази [10].

Сірка, що потрапляє в піч разом із паливом, переважно окислюється до SO_2 . Однак її внесок у загальний рівень викидів мінімальний, оскільки в зонах кальцинування та спікання діоксид сірки реагує з лужними компонентами, такими як кальцій, утворюючи стійкі сульфати, які залишаються в системі.

Процес циркуляції сірки в обертовій печі є складним і динамічним. У зоні кальцинування SO_2 , що утворюється при розкладанні сульфатів, вступає в реакцію з лужними сполуками та лужними сульфатами, присутніми в сировині. Спочатку формується сульфід кальцію ($CaSO_3$), який згодом окислюється до сульфату кальцію ($CaSO_4$). Ці сполуки повертаються в піч, підтримуючи циклічний процес і баланс сірки в системі. Проте за недостатньої концентрації кисню в зоні горіння частина SO_2 може виводитися з газовими викидами [9].

На інтенсивність викидів SO_2 впливають кілька факторів, зокрема:

1. Температура – оптимальні умови для зв'язування SO_2 виникають у зоні декарбонізації за високих температур.
2. Вологість – вміст води у сировинній суміші може впливати на реакції з утворенням сульфатів.
3. Час перебування газу – більший час контакту газу з сировиною сприяє кращому уловлюванню сірки.
4. Концентрація кисню та інших газів – недостатній вміст кисню у печі може призводити до підвищення викидів SO_2 .

У європейських країнах встановлено суворі нормативи на рівень викидів SO_2 з цементних заводів. Відповідно до «Довідкового документа про найкращі доступні технології для виробництва цементу, вапна та оксиду магнію», допустимі рівні викидів знаходяться у діапазоні 50 - 400 мг/м³ залежно від типу печі та впроваджених технологій очищення [8 - 10].

Для мінімізації викидів SO_2 у цементній промисловості застосовуються такі методи: використання сировини з низьким вмістом сірки; оптимізація процесу горіння (контроль температури та забезпечення оптимальної концентрації кисню); системи очищення газів (впровадження сучасних

технологій очищення, таких як вапняне або натрієве промивання, які дозволяють зв'язувати SO_2 у газовій фазі).

Діоксид сірки є значущим забруднювачем, який утворюється у процесі виробництва цементу. Розуміння механізмів його утворення та циркуляції в системі печі є ключовим для розробки технологій зниження впливу цементної промисловості на довкілля [9].

1.1.2.3. Викиди оксиду та діоксиду вуглецю у процесі виробництва цементу

Процес виробництва цементу супроводжується значними викидами діоксиду вуглецю (CO_2), що є однією з основних екологічних проблем галузі. Розраховано, що на кожну тонну сірого клінкеру виділяється приблизно 900 - 1000 кг CO_2 за умов споживання теплової енергії в діапазоні 3500 - 5000 кДж/т клінкеру. Проте ця величина залежить від типу палива, що використовується, а також від технологічних умов випалу клінкеру.

Серед основних джерел викидів CO_2 виділяють: декарбонізація вапняку (процес розкладу $CaCO_3$ на CaO та CO_2 у зоні спікання клінкеру, цей процес відповідає за 62% загального обсягу викидів CO_2); спалювання палива (горіння органічних сполук, присутніх у паливі, генерує решту 38% CO_2 , обсяг викидів пропорційний питомій витраті тепла та співвідношенню вмісту вуглецю в паливі до його теплотворної здатності)[11].

Протягом останніх 25 років обсяги CO_2 , що утворюються під час спалювання палива, зменшилися на 30% завдяки вдосконаленню технологічних процесів, зокрема покращенню ефективності горіння у печах. Додаткове скорочення викидів відбувається за рахунок часткового заміщення клінкеру у цементі мінеральними домішками, що дозволяє зменшити кількість CO_2 на тонну готового продукту [10].

Викиди оксиду вуглецю (CO) пов'язані з наявністю органічних речовин у сировинних матеріалах, які потрапляють у піч під час геологічного формування вапняків. Під час нагрівання у теплообміннику ці органічні сполуки окислюються, утворюючи CO та CO_2 . Залежно від складу сировини: 85 - 95%

органічного вуглецю перетворюється на CO_2 за наявності 3% кисню; 5 - 15% органічного вуглецю переходить у CO , а концентрація залишкових органічних сполук залишається нижчою за 1% [8,10].

Концентрація CO у відхідних газах може становити більше 1000 мг/м³, іноді досягаючи 5000 мг/м³ за несприятливих умов горіння. Високий вміст CO виникає через нестехіометрію горіння, неповне згоряння палива або неправильні параметри роботи декарбонізаторів. Такі умови також можуть сприяти утворенню інших забруднювачів, таких як SO_2 [8].

Природні сировинні матеріали можуть містити від 1,5 до 6 г органічного вуглецю на кожен кілограм клінкеру, залежно від родовища. Неповне згоряння органічного вуглецю створює піки викидів CO , які можуть перевищувати 0,5%. Це викликає додаткові проблеми, зокрема: збій в роботі електрофільтрів через необхідність автоматичного відключення для запобігання вибухам; зниження ефективності очищення відхідних газів.

Зниження викидів CO_2 та CO в цементній промисловості можливе завдяки впровадженню інноваційних технологій та вдосконаленню виробничих процесів. Одним із важливих методів є підвищення ефективності спалювання палива за рахунок використання сучасних пальників, які забезпечують рівномірний розподіл температури та оптимальні умови горіння. Додатково значного скорочення викидів можна досягти завдяки частковій заміні клінкеру на альтернативні матеріали, такі як шлак, летюча зола та пуцолани, що зменшує потребу у випалюванні карбонатної сировини. Важливим кроком також є перехід на екологічно чистіші види палива, наприклад, біопаливо або енергоносії з меншим вмістом вуглецю, що допомагає суттєво скоротити загальний вуглецевий слід галузі [11].

Забезпечення оптимального співвідношення палива і кисню під час горіння сприяє мінімізації пікових значень CO та CO_2 у вихідних газах, підвищуючи екологічність виробництва [10].

1.1.2.4. Викид металів та їх сполук у процесі виробництва цементу

Метали та їхні сполуки надходять до обертової печі разом із сировинними матеріалами, паливом або паливовмісними відходами. Їх концентрація може значно варіювати залежно від походження сировини та виду палива. У процесі випалу клінкеру метали піддаються термічним перетворенням, внаслідок чого утворюються оксиди металів та інші леткі й нелеткі сполуки. Рівень емісії металів в атмосферу визначається їхньою леткістю, механізмом рециркуляції у пічній системі, а також ефективністю роботи пиловловлюючого обладнання [12].

Залежно від леткості метали та їхні сполуки поділяються на чотири основні класи. Нелеткі метали, до яких належать тугоплавкі елементи, такі як *Ba, Be, Cr, As, Ni, Al, Ca, Fe, Mn, Cu, Ag*, адсорбуються клінкером у процесі випалу та виводяться з печі разом із готовим продуктом. В атмосферу вони потрапляють лише у складі пилу, а рівень їхньої емісії залежить від ефективності роботи пиловловлюючих установок. Частково леткі метали, серед яких *Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K, Na*, сублімують у вигляді сульфатів або хлоридів за температури 1000 – 1300°C і конденсуються при 700 – 900°C, створюючи цикл внутрішньої рециркуляції в нижніх зонах циклонного теплообмінника. Ці метали частково адсорбуються клінкером або осаджуються у пиловловлювачах. Високолеткі метали, зокрема талій (*Tl*), характеризуються значною леткістю. Сполуки талію, такі як *TlCl*, конденсуються за температури 450 – 550°C, накопичуючись у пилу верхніх зон теплообмінника. Високолеткі метали, зокрема ртуть (*Hg*), переважно залишають піч у вигляді газоподібних сполук. Лише незначна їхня частка може осідати на пилових частинках під час різкого охолодження газового потоку, після чого накопичується у системах пиловловлення. Проте основна маса ртуті – приблизно 98% – виводиться з печі разом із відхідними газами, що ускладнює її утилізацію та потребує додаткових заходів для зменшення викидів [8].

Частково леткі та високолеткі метали мають властивість накопичуватися у внутрішньому циклі печі та теплообмінника, проходячи процес рециркуляції. В результаті їх концентрація поступово збільшується в окремих зонах системи, що може спричиняти зростання викидів у атмосферу. Більша частина кадмію ($\approx 88\%$)

і свинцю ($\approx 77\%$) виводиться разом із пиловими частинками, тоді як решта цих металів залишається у складі клінкеру [12].

Важкі метали проявляють токсичну дію при вдиханні пилу або парів, а також при контакті зі шкірою, що становить небезпеку для здоров'я людини. У країнах Європи рівень їхніх викидів суворо регламентується міжнародними стандартами, такими як Шведський норматив (LRV) та Німецький регламент (TA-Luft). Відповідно до цих вимог, метали I класу токсичності (*Hg, Cd, Tl, Pb*) можуть міститися в газових викидах у сумарній концентрації не більше $0,20 \text{ мг/м}^3$. До II класу належать *As, Co, Ni, Se, Ti*, і для них встановлено граничний рівень у $1,00 \text{ мг/м}^3$. Метали III класу, такі як *Cr, Cu, Sb, Sn, V*, мають допустиму концентрацію, що не перевищує $5,00 \text{ мг/м}^3$ [8].

Зменшення емісії металів у цементній промисловості досягається завдяки впровадженню комплексних технологічних рішень. Одним із ключових заходів є оптимізація складу сировини, яка передбачає використання матеріалів із мінімальним вмістом важких металів. Важливим є також контроль температури у печі, що забезпечує умови, за яких леткі метали залишаються у пічній системі та осаджуються разом із клінкером, мінімізуючи їхню емісію. Значну роль відіграють сучасні системи пиловловлення, зокрема вискоєфективні електрофільтри та рукавні фільтри, які знижують рівень пиловиділення. Додатково, моніторинг викидів за допомогою автоматичних систем контролю дозволяє вчасно виявляти перевищення концентрації металів у газових викидах і оперативно реагувати для підтримання нормативного рівня [11,12].

1.1.2.5. Викиди газоподібних хлоридів та фторидів у цементній промисловості

Неорганічні хлор- і фторвмісні сполуки природним чином присутні у складі портландцементного клінкеру. Як правило, їхня концентрація не перевищує $0,05 - 0,1\%$ від загальної маси, якщо розглядати вміст у перерахунку на хлорид-іон (Cl^-) [13]. Ці сполуки надходять у систему обертової печі двома шляхами:

- як домішки у сировинних матеріалах;

- у деяких випадках – як спеціальні добавки, що сприяють інтенсифікації процесу клінкероутворення та зниженню температури випалу.

Під час високотемпературних процесів хлориди та фториди взаємодіють із лужними елементами сировинної суміші (*Ca, Na, K* тощо), утворюючи леткі сполуки. Внаслідок їх високої леткості, лужні хлориди та фториди сублімуються в гарячих зонах печі (декарбонізація, твердофазні реакції, спікання) і переносяться потоками димових газів до більш холодних зон, де за температур 600 - 900°C знову переходять у твердий стан (конденсуються). Осідаючи на поверхні частинок пилу та сировинної суміші, ці сполуки знову надходять до гарячих зон печі, створюючи циклічний кругообіг у системі обертової печі та циклонного теплообмінника [11,13].

Виникнення кругообігу лужних хлоридів і фторидів призводить до негативних ефектів, таких як, налипання матеріалів та збільшенні концентрації у клінкері. Утворення легкоплавких сполук викликає налипання пекучого матеріалу на стінках циклонів, футеровці печі та газоходах, що порушує газодинамічний режим роботи агрегату. Накопичення хлоридів і фторидів у певних зонах печі сприяє їх надмірній концентрації у клінкері та пиловиносі.

Для розриву кругообігу хлоридів і фторидів використовується система байпасування пічних газів. Її принцип дії передбачає відбір невеликої частини димових газів (5 - 15% об.) із зони печі або теплообмінника за температури 900 - 1000°C. Ці гази містять хлориди і фториди у газоподібному стані. Після відбору гази швидко охолоджуються до 400 - 550°C шляхом розбавлення повітрям або впорскуванням води. У процесі охолодження газоподібні сполуки хлору та фтору конденсуються на поверхні пилових частинок, які потім вловлюються у циклоні або рукавному фільтрі [13].

Зібраний пил, що містить осілі сполуки хлору та фтору, може бути утилізований як відхід або використаний як додатковий компонент під час помелу портландцементу. Завдяки цьому концентрація хлоридів і фторидів у пічній системі поступово знижується до допустимих рівнів [8].

Основними недоліками системи байпасування є збільшення питомої витрати тепла (втрата теплової енергії через відбір частини димових газів підвищує енерговитрати на випал клінкеру) та утворення додаткових відходів (зібраний пил із високим вмістом хлоридів та фторидів потребує спеціальної утилізації або переробки).

Викиди хлоридів (HCl) і фторидів (HF) значною мірою залежать від ефективності роботи пиловловлюючих систем, особливо щодо частинок пилу дрібної фракції (<10 мкм). За даними досліджень, проведених на цементних заводах ЄС, середні значення викидів HCl становлять 3,63–4,23 мг/м³, тоді як HF – 0,32–0,61 мг/м³, причому у багатьох випадках концентрація HF була нижчою за межу виявлення [8].

Викиди хлоридів та фторидів у цементній промисловості створюють значний екологічний ризик і впливають на ефективність роботи пічного обладнання. Використання системи байпасування пічних газів дозволяє розірвати кругообіг цих сполук у пічній системі, зменшуючи їх концентрацію до нормативного рівня. Водночас необхідно вдосконалювати технології пиловловлювання та оптимізувати витрати теплової енергії для мінімізації негативного впливу на довкілля.

1.1.3. Техногенний вплив на водне середовище у процесі виробництва цементу

Галузь виробництва цементу зазвичай не є основним джерелом водних викидів порівняно з іншими промисловими сферами. Основні технологічні етапи виробництва цементу, а саме, при сухому способі, споживають незначну кількість води, і більшість її використовується в замкнених системах без утворення стічних вод [14]. Проте існують певні аспекти, де цементні заводи можуть впливати на водні ресурси, і ці впливи потребують аналізу та управління.

Вода найчастіше використовується для охолодження деяких елементів обладнання, таких як підшипники або компресори. Якщо система охолодження є відкритою, то вода після використання може скидатися у водні об'єкти, несучи з собою підвищену температуру та можливі забруднювачі [15].

Вода застосовується для промивання обладнання, очищення території заводу та миття транспортних засобів. Ці стічні води можуть містити завислі тверді частинки, масла та інші забруднювачі [16].

Атмосферні опади, проходячи через територію підприємства, можуть змивати пил, залишки сировини та продукти виробництва, формуючи поверхневий стік, який потенційно може забруднювати навколишні водні об'єкти [17].

Стічні води, що утворюються на цементних заводах, можуть містити такі забруднювачі:

- Завислі тверді частинки (ЗТЧ): частинки сировини, клінкеру або цементу, які можуть збільшувати мутність води та осідати в донних відкладах [18].
- Нафтопродукти та масла: використовуються в обладнанні та транспортних засобах, можуть потрапляти у воду при промиванні або через витоки [19].
- Підвищена лужність: використання вапнякових матеріалів може призводити до підвищення рівня pH у воді, що потенційно негативно впливає на водні екосистеми. [20].

Скидання неочищених або недостатньо очищених стічних вод може призводити до забруднення річок, озер та ґрунтових вод, впливаючи на флору і фауну.

Підвищений вміст завислих речовин та поживних елементів може сприяти надмірному росту водоростей та інших організмів, що погіршує якість води [21].

Скидання нагрітої води може призводити до змін температурного режиму водних об'єктів, впливаючи на життєдіяльність водних організмів [15].

Хоча цементна промисловість не є основним джерелом викидів у воду, проте потенційні ризики для водних ресурсів існують. Зниження негативного впливу на довкілля можливе завдяки впровадженню сучасних технологій водоочищення, удосконаленню виробничих процесів та строгому дотриманню екологічних стандартів.

В Україні контроль викидів у водні об'єкти здійснюється згідно з Водним кодексом України та іншими нормативно-правовими актами [22]. Підприємства

зобов'язані отримувати дозволи на спеціальне водокористування та дотримуватися гранично допустимих концентрацій (ГДК) забруднювачів у стічних водах.

1.2. Методи фіксації поширення пилового забруднення в атмосфері

Забруднення повітря цементним пилом є серйозною екологічною проблемою, особливо в регіонах з розвиненою цементною промисловістю. Багато науковців досліджували ступінь розповсюдження цементного пилу та методи визначення його концентрацій у навколишньому середовищі.

Одним із значущих досліджень у цій галузі є робота Адака М.Д., Адака С. та Пурохіта К.М. (2007) [23]. Вони вивчали якість повітря та потенційні ризики для здоров'я населення, що проживає поблизу малих цементних заводів. Науковці з'ясували, що рівень дрібнодисперсного пилу (PM10 і PM2.5) у повітрі суттєво перевищує допустимі межі, що може негативно впливати на здоров'я людей.

Для вимірювання концентрацій завислих твердих частинок дослідники використовували високопродуктивні повітрозабірники. Ці прилади дозволяють пропускати великий об'єм повітря через спеціальні фільтри протягом тривалого часу, зазвичай 24 години. Завдяки цьому можна зібрати достатню кількість частинок для подальшого аналізу. Пробовідбірники встановлювали в різних точках навколо малих цементних заводів, щоб оцінити просторовий розподіл концентрацій пилу. Пункти відбору були розміщені на різних відстанях і напрямках від джерел викидів. Відбір проб проводився протягом певного періоду, щоб охопити різні метеорологічні умови та режими роботи заводів. Це дозволило отримати репрезентативні дані про концентрації пилу. Після відбору проб фільтри висушували та зважували для визначення маси зібраних частинок. Різниця в масі фільтра до і після відбору дозволяла розрахувати концентрацію PM10 і PM2.5 у повітрі.

Зібрані дані показали, що рівень забруднення зменшується з віддаленістю від джерела викидів, але залишається високим у населених пунктах, розташованих поблизу заводів. Хімічний аналіз зразків виявив присутність

важких металів та інших токсичних компонентів, характерних для цементного пилу.

У своєму дослідженні Ал-Хашман О.А. та Шавабкех Р.А. (2006) аналізували розподіл металів у ґрунтах поблизу цементного заводу, розташованого на півдні Йорданії [24]. Головною метою дослідження було оцінити вплив осідання цементного пилу на рівень важких металів у ґрунтах поблизу підприємств, що є важливим фактором для аналізу екологічних ризиків та потенційних загроз здоров'ю місцевих жителів.

Зразки ґрунту були зібрані з різних точок на відстанях 0,5 км, 1 км, 1,5 км та 2 км від цементного заводу в різних напрямках. Такий підхід дозволив охопити просторовий розподіл забруднення. Також були зібрані контрольні зразки з віддалених районів, не підданих впливу викидів заводу.

Для аналізу вмісту у ґрунтах важких металів застосовували метод атомно-абсорбційної спектрофотометрії (ААС). Підготовка зразків передбачала етапи висушування, просіювання та обробки кислотним розкладом, що забезпечувало точність подальших вимірювань. Досліджували концентрації таких металів, як свинець (*Pb*), кадмій (*Cd*), цинк (*Zn*), мідь (*Cu*), нікель (*Ni*) і хром (*Cr*).

Дослідження показало, що концентрація всіх аналізованих металів у зразках ґрунту, зібраних поблизу цементного заводу, була значно вищою порівняно з контрольними зразками. Найвищі концентрації спостерігалися на відстані 0,5 км від заводу. Концентрації металів зменшувалися зі збільшенням відстані від джерела викидів, що свідчить про вплив цементного пилу як основного джерела забруднення. Деякі концентрації металів перевищували гранично допустимі рівні, встановлені міжнародними екологічними стандартами, що вказує на потенційну небезпеку для навколишнього середовища та здоров'я людей.

Дослідження показало, що цементний завод є значним джерелом забруднення ґрунтів важкими металами в навколишніх районах. Використання атомно-абсорбційної спектрофотометрії дозволило точно визначити концентрації металів та оцінити ступінь забруднення. Отримані результати

підкреслюють важливість екологічного контролю та впровадження заходів з охорони довкілля. Автори наголосили на необхідності впровадження очисних технологій на цементному заводі, регулярного моніторингу якості ґрунтів та розробки заходів щодо зменшення викидів.

У дослідженні, проведеному Садханою Чаурасією, Ікбалом Ахмадом, Анандом Девом Гуптою та Санатаном Кумаром (2012), здійснено оцінку викидів забруднення повітря від цементних підприємств у місті Німбахера, штат Раджастхан, Індія [25]. Метою роботи було вивчення впливу цементної промисловості на якість повітря в регіоні та визначення концентрацій забруднювачів, що викидаються цими підприємствами.

Дослідники обрали кілька стратегічних точок навколо цементних заводів, розташованих на відстанях 0,5 км, 1 км та 2 км у різних напрямках від джерел викидів. Ці точки включали житлові зони, сільськогосподарські угіддя та контрольні ділянки, віддалені від промислових об'єктів. Такий підхід дозволив отримати репрезентативні дані про просторовий розподіл забруднення.

Для збору завислих твердих частинок (TSP), а також дрібнодисперсного пилу PM10 і PM2.5 використовували високопродуктивні повітрязабірники з відповідними фільтрами, виготовленими з матеріалу, що забезпечує ефективне затримання частинок необхідного розміру. Для відбору проб газоподібних забруднювачів, зокрема діоксиду сірки (SO_2) та оксидів азоту (NO_x), застосовували пробовідбірники з абсорбуючими розчинами, які хімічно взаємодіють із цими газами.

Відбір проб проводився протягом 24 годин для отримання середньодобових концентрацій забруднювачів та врахування добових коливань. Повітрязабірники встановлювали на висоті приблизно 1,5 - 2 метри над рівнем землі, що відповідає рівню дихання людини. Перед початком вимірювань усе обладнання калібрували відповідно до стандартних процедур для забезпечення точності та надійності даних.

Після відбору проб фільтри висушували в контрольованих умовах та зважували на високоточних аналітичних вагах для визначення маси зібраних

частинок. Різниця в масі фільтра до і після відбору дозволяла розрахувати концентрацію завислих частинок у повітрі. Зразки абсорбуючих розчинів аналізували за допомогою стандартних хімічних методів: для SO_2 застосовували парарозпилювальну титриметрію, а для NO_x - спектрофотометричні методи.

Для перевірки повторюваності та надійності результатів у деяких пунктах відбору проб проводили паралельні вимірювання. Використовували контрольні фільтри та розчини, які не піддавалися впливу повітря, щоб виявити можливе забруднення під час транспортування та аналізу. Під час відбору проб реєстрували метеорологічні параметри - температуру, вологість, швидкість і напрямок вітру - оскільки вони впливають на розповсюдження забруднювачів.

Такий ретельний підхід до відбору проб забезпечив високу якість і достовірність отриманих даних. Це дозволило дослідникам точно визначити концентрації забруднювачів у різних точках навколо цементних заводів, оцінити просторовий розподіл забруднення та виявити зони з найбільшим впливом. Крім того, проведене дисперсійне моделювання з використанням моделі AERMOD на основі реальних вимірювань підвищило точність прогнозів.

Робота Чаурасії та співавторів [25] надає важливу інформацію про вплив цементної промисловості на якість повітря в регіоні Німбахера. Отримані дані свідчать про важливість запровадження дієвих заходів для скорочення викидів забруднювачів та покращення екологічного стану в регіоні. Дослідження також акцентує увагу на важливості поєднання дисперсійного моделювання з реальними вимірюваннями для отримання достовірних даних про забруднення повітря.

1.3. Вибір методу дослідження та постановка завдання

1.3.1. Модель AERMOD. Основні принципи використання.

Модель AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model) створена для прогнозування неперервних викидів від рівня землі та дисперсії переривистих викидів має декілька важливих характеристик, які забезпечують її точність і гнучкість: турбулентні потоки є лінійними, при цьому середня та вертикальна швидкості вітру рівні нулю; враховуючи метеорологічні умови на різних висотах

модель дозволяє прогнозувати профілі температури, вітру, турбулентності середовища, враховувати будівельні аспекти, моделювати сухий та мокрий спосіб осадження домішок. Модель була розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA) разом з American Meteorological Society (AMS) [26].

Таблиця 3.1 містить ключові характеристики моделі AERMOD, які використовуються для моделювання поширення забруднень в атмосфері.

Таблиця 1.1.

Ключові характеристики моделі AERMOD

Характеристика	Опис
1	2
Тип моделі	Атмосферна дисперсійна модель для забруднюючих речовин застосовується для моделювання розсіювання викидів від стаціонарних джерел, зокрема промислових об'єктів.
Тип джерел	Точкові, лінійні, об'ємні, поверхневі
Типи забруднювачів	Газоподібні та тверді частинки (SO ₂ , NO _x , PM ₁₀ , PM _{2.5} та інші)
Метеорологічні умови	Враховуються поверхневі та глибинні умови, температура, вітер, турбулентність
Топографічний вплив	Може враховувати складний рельєф (гори, будівлі) через препроцесор AERMAP
Метеорологічний препроцесор	AERMET для обробки метеорологічних даних
Топографічний препроцесор	AERMAP для визначення висоти джерел та точок розрахунку
Розрахунковий період	Короткостроковий (години, дні) та довгостроковий (роки) моделі

1	2
Облік впливу будівель	ВРІПРМ для врахування впливу будівель на розсіювання забруднюючих речовин
Регуляторне використання	Оцінка якості повітря, дозвільні процедури, екологічні оцінки

На зображенні 1.2. представлено 3D модель AERMOD, що демонструє розповсюдження забруднюючих речовин від заводу.



Рис. 1.2. – 3D приклад моделі AERMOD

Завод розташований ліворуч, з підписом "Factory". Це джерело забруднення, з якого виходить хмара. Стрілки напрямку вітру показують, як повітряні маси рухаються від лівого до правого боку з підписом "Wind Direction". Стрілки та лінії відображають траєкторію руху забруднюючих речовин.

Хмара забруднення, позначена як "Pollution Cloud", показана у вигляді градієнтної хмари, що змінює свою інтенсивність залежно від відстані від заводу. Густіша частина хмари ближче до заводу, і вона поступово зменшується в міру віддалення від джерела.

1.3.2. Модель CALPUFF.

Модель CALPUFF - це нелінійна атмосферна дисперсійна модель, яка використовується для моделювання поширення забруднювачів повітря на великих територіях зі складними метеорологічними умовами та рельєфом [27]. Вона здатна враховувати вплив змінних вітрів, місцевих погодних умов, складних топографічних особливостей - гір, пагорбів, водних об'єктів - а також моделювати процеси дисперсії забруднень у тривимірному просторі [28].

CALPUFF відзначається своєю гнучкістю та точністю при використанні для довгострокових і короткострокових прогнозів забруднень, особливо в умовах складного рельєфу та в регіонах із нестабільною метеорологією [28]. Вона широко застосовується для оцінки якості повітря та задоволення регуляторних вимог [27].

У таблиці 1.2 описані основні характеристики моделі.

Таблиця 1.2

Основні характеристики моделі CALPUFF

Характеристика	Опис
1	2
Тип моделі	Комплексна атмосферна дисперсійна модель для регіональних та локальних масштабів
Типи джерел	Точкові, лінійні, об'ємні, поверхневі, стаціонарні та рухомі джерела
Типи забруднювачів	Газоподібні речовини (SO_2 , NO_x) та тверді частинки (PM10, PM2.5)
Метеорологічні умови	Враховує змінні вітри, локальні та регіональні циркуляції, інверсії, турбулентність
Топографія	Враховує складні рельєфи (гори, пагорби, водні об'єкти)
Метеорологічний препроцесор	CALMET для обробки тривимірних метеорологічних полів

1	2
Облік впливу будівель	Враховує вплив будівель на поширення забруднень
Часовий період	Короткострокові (години) та довгострокові (роки) оцінки
Регуляторне використання	Оцінка якості повітря на великих територіях, регіональні та локальні оцінки

Рисунок 1.3. показує 3D модель розсіювання забруднюючих речовин за допомогою моделі CARPUFF. На зображенні є такі ключові елементи:

Димова труба позначена символами:

H — висота труби.

Q — швидкість викиду забруднюючих речовин.

Напрямок вітру показано великими стрілками, що вказують, куди рухається повітря, і відображають силу та напрям вітру.

Забруднюючі речовини виходять з труби і поширюються по вітру.

X — відстань по вітру, що показує, як далеко поширюється викид.

C — концентрація забруднюючих речовин, що змінюється з відстанню.

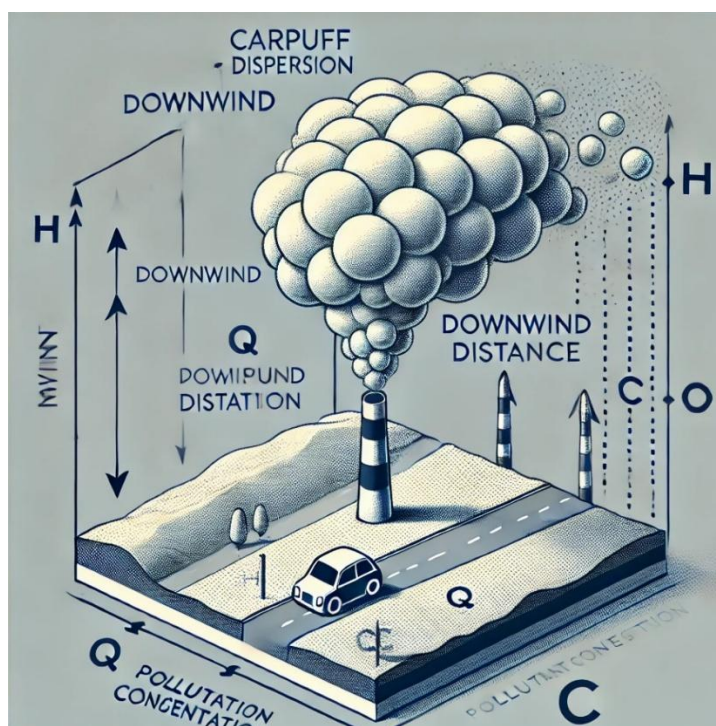


Рис. 1.3.— 3D модель CARPUFF

Модель CALPUFF надає інструменти для оцінки впливу цементного пилу на довкілля і здоров'я населення, що може допомогти у розробці планів щодо зниження викидів і покращення умов праці на цементних виробництвах.

1.3.3. Автоматизована система прийняття рішень (модель ADMS).

Модель ADMS (Atmospheric Dispersion Modelling System) — це сучасна комп'ютерна система для моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. Ця модель застосовується для прогнозування концентрацій забруднювачів повітря, зокрема газів і частинок, на різних відстанях від джерел викидів, з урахуванням метеорологічних умов, рельєфу місцевості та особливостей самих викидів [29].

Модель ADMS відіграє ключову роль у підвищенні екологічної безпеки та збереженні здоров'я населення. Вона надає точні й надійні дані, що сприяють ухваленню обґрунтованих рішень щодо контролю промислових викидів та впровадження ефективних природоохоронних заходів [30].

У таблиці 1.3 наведено основні характеристики моделі ADMS.

Таблиця 1.3.

Основні характеристики моделі ADMS

Характеристика	Опис
1	2
Тип моделі	Сучасна дисперсійна модель атмосферного розповсюдження забруднювачів з параметризацією прикордонного шару атмосфери
Типи джерел	Точкові, лінійні, площинні та об'ємні джерела
Типи забруднювачів	Гази (SO_2 , NO_x , CO), частинки (PM_{10} , $PM_{2.5}$), запахи, важкі метали, радіоактивні речовини

1	2
Метеорологічні умови	Враховує детальні метеорологічні параметри: швидкість і напрямок вітру, температуру, турбулентність, стабільність атмосфери
Топографія	Враховує складний рельєф місцевості, включаючи пагорби, долини та будівлі
Метеорологічний препроцесор	Використовує вбудований препроцесор для обробки метеорологічних даних та отримання необхідних параметрів для моделювання
Облік впливу будівель	Враховує ефекти будівель на розповсюдження забруднювачів, включаючи будинковий ефект (building downwash)
Часовий період	Може моделювати як короткострокові періоди (години, дні), так і довгострокові (місяці, роки)
Регуляторне використання	Широко використовується для екологічної оцінки, планування та забезпечення відповідності регуляторним вимогам у багатьох країнах

На рисунку 1.4. зображена побудована модель ADMS для цементного виробництва.

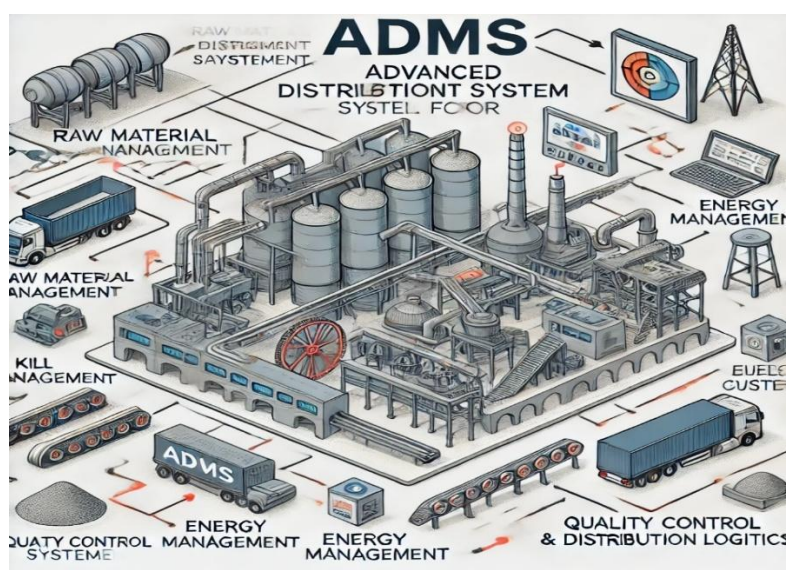


Рисунок 1.4. – ADMS модель для цементного виробництва.

Модель ADMS, створена для цементного виробництва, об'єднує низку взаємопов'язаних компонентів, що дозволяють ефективно контролювати всі етапи технологічного процесу. Вона охоплює контроль за запасами та використанням сировини, що сприяє оптимізації виробничих ресурсів. Також система здійснює моніторинг печей, відстежуючи температурні режими та інші критично важливі параметри під час випалу цементу. Важливим елементом є управління енергоспоживанням, що дозволяє підвищити ефективність роботи підприємства та знизити витрати. У складі моделі працює SCADA-система, яка в режимі реального часу збирає й аналізує дані для контролю виробничих процесів. Додатково впроваджується перевірка відповідності продукції встановленим стандартам на всіх етапах виробництва, що гарантує високу якість цементу. Завершальним етапом є управління ланцюгом постачання та логістикою розподілу готової продукції, що сприяє ефективній організації доставки до споживачів [31,32].

1.3.4. Модель HYSPLIT

Модель HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) - це спеціалізована комп'ютерна програма, створена Національним управлінням океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA), яка використовується для прогнозування руху повітряних частинок і моделювання процесів розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері. Вона дозволяє аналізувати траєкторії перенесення частинок, їхнє осідання та поширення в повітряному середовищі, що має важливе значення для оцінки впливу промислових викидів, вивчення забруднення навколишнього середовища та розробки екологічних заходів [34].

Модель HYSPLIT є потужним інструментом для моделювання розсіювання забруднювачів від цементних виробництв. Вона допомагає підприємствам та регуляторним органам оцінити вплив викидів на навколишнє середовище та розробити ефективні стратегії зменшення негативних наслідків. Використання HYSPLIT сприяє більш відповідальному та екологічно свідомому управлінню промисловими процесами [33]. У таблиці 1.4. наведені основні характеристики моделі.

Таблиця 1.4.

Основні характеристики моделі HYSPLIT

Характеристика	Опис
1	2
Тип моделі	Гібридна лагранжево-ейлерова модель. Поєднує лагранжевий підхід для відстеження траєкторій частинок та ейлеровий підхід для моделювання концентрацій забруднювачів у просторі та часі.
Типи джерел	Точкові, лінійні, площинні та об'ємні джерела. Модель може моделювати викиди від різних типів джерел, включаючи димові труби цементних заводів, транспортні лінії, відкриті кар'єри та інші промислові об'єкти.
Типи забруднювачів	Газоподібні речовини, аерозолі, тверді частинки та радіоактивні матеріали. Може враховувати хімічні реакції, трансформації та осадження забруднювачів на поверхню землі або води.
Метеорологічні умови	Детальні тривимірні метеорологічні дані. Використовує інформацію про вітрові потоки, температуру, вологість, атмосферний тиск, турбулентність та інші параметри з метеорологічних моделей або спостережень для точного моделювання розсіювання забруднювачів.
Топографія	Врахування рельєфу місцевості. Модель може враховувати висоти поверхні, гори, долини та інші топографічні особливості, які впливають на потоки повітря та розсіювання забруднювачів.
Метеорологічний препроцесор	Вбудований препроцесор метеорологічних даних. HYSPLIT може обробляти та інтерполювати метеорологічні дані з різних джерел, таких як NWP-моделі (Numerical Weather Prediction) або дані спостережень, для підготовки їх до використання в моделюванні.

1	2
Облік впливу будівель	Обмежений. Модель не враховує детально мікромасштабні ефекти будівель на потоки повітря та розсіювання забруднювачів. Для моделювання впливу будівель рекомендується використовувати спеціалізовані модулі або інші моделі, такі як CFD (Computational Fluid Dynamics) або підключення до більш детальних міських моделей.
Часовий період	Від годин до місяців. Може моделювати короткострокові події, такі як аварійні викиди, та довгострокове розсіювання забруднювачів для оцінки хронічного впливу на довкілля.
Регуляторне використання	Широко використовується в наукових дослідженнях та аварійному реагуванні.

Модель допомагає прогнозувати траєкторії та концентрації забруднювачів, таких як пил, оксиди азоту, діоксид сірки та інші речовини, що викидаються під час виробництва цементу. Дані моделювання можуть слугувати основою для розробки дієвих стратегій скорочення викидів, удосконалення технологічних процесів та впровадження інноваційних методів очищення повітря. Використання HYSPLIT сприяє більш усвідомленому підходу до управління впливом на довкілля, що може покращити репутацію підприємства та відповідність екологічним нормам.

На зображенні 1.5. представлено спрощену візуалізацію моделі HYSPLIT для цементної промисловості. Центральним елементом є завод із трубами, з яких виходить дим, що символізує викиди в атмосферу. Від труб тягнуться стрілки, що показують напрямки розсіювання забруднювальних речовин у повітрі.



Рисунок 1.5. – Приклад побудови моделі HYSPLIT

Однак при застосуванні HYSPLIT у цементній промисловості слід враховувати такі особливості: модель не детально враховує мікромасштабні ефекти будівель та інфраструктури заводу, що може впливати на точність розрахунків у безпосередній близькості від джерела викидів; точність моделювання сильно залежить від достовірності метеорологічних даних, характеристик джерел викидів та топографічних особливостей місцевості; HYSPLIT не завжди є офіційно затвердженою моделлю для регуляторних оцінок у деяких країнах [33,34].

1.3.5. Переваги моделі AERMOD для дисертаційного дослідження.

Вибір моделі AERMOD для цієї дисертаційної роботи обґрунтований її численними перевагами перед моделями CALPUFF, ADMS та HYSPLIT. AERMOD є сучасною регуляторною моделлю розсіювання забруднюючих речовин, розробленою Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA) і широко визнаною в міжнародній спільноті [35].

Ця модель спеціально призначена для моделювання розсіювання в умовах сталих метеорологічних полів на відстанях до 50 км від джерела [36], що робить її ідеальною для оцінки впливу промислових викидів на локальному рівні. У

порівнянні з CALPUFF, яка є несталою моделлю та краще підходить для довгострокових і регіональних оцінок [37], AERMOD забезпечує вищу точність при короткостроковому прогнозуванні та в умовах простих метеорологічних ситуацій.

AERMOD має вдосконалені алгоритми для врахування складного рельєфу місцевості та урбаністичних умов [38]. На відміну від ADMS, яка може мати обмеження у моделюванні складних топографічних умов [39], AERMOD використовує детальні профілі вітру та температури для більш точного прогнозування розсіювання [36].

Модель HYSPLIT більше орієнтована на моделювання довготривалих траєкторій повітряних мас і не забезпечує такої деталізації в локальному масштабі, як AERMOD [40]. HYSPLIT підходить для глобальних і регіональних аналізів, тоді як AERMOD надає детальний аналіз концентрацій забруднюючих речовин поблизу джерел викидів [41].

Крім того, AERMOD відзначається простотою використання та меншою вимогливістю до обчислювальних ресурсів у порівнянні з CALPUFF та HYSPLIT [42]. Це забезпечує оперативне отримання результатів із високою точністю, що має ключове значення для своєчасного прийняття рішень у сфері екологічного управління.

Таким чином, AERMOD пропонує оптимальний баланс між складністю моделювання та точністю результатів, що є критичним для успішного виконання дослідження та отримання надійних висновків [43].

Висновки до розділу 1

1. Цементна промисловість є стратегічно важливою для економіки України, забезпечуючи будівельну галузь необхідними матеріалами та підтримуючи розвиток інфраструктури.
2. Процес виробництва цементу є ресурсомістким та енергомістким, потребує значних обсягів сировини (вапняку, глини, мергелю) та енергоносіїв, що сприяє утворенню значних промислових викидів.

3. Основним екологічним наслідком цементного виробництва є забруднення атмосферного повітря пилом, оксидами азоту (NO_x), діоксидом сірки (SO_2), вуглекислим газом (CO_2) та важкими металами.
4. Викиди пилу є найпоширенішим джерелом забруднення, що утворюється на всіх етапах виробництва - від подрібнення сировини до фасування цементу.
5. Викиди NO_x формуються при високотемпературному випалюванні клінкеру, сприяють утворенню фотохімічного смогу та кислотних дощів, що погіршує якість повітря.
6. Діоксид сірки (SO_2) утворюється під час спалювання сірковмісного палива та розкладу сульфатних сполук, що сприяє появі кислотних дощів та негативно впливає на екосистеми.
7. Цементне виробництво є значним джерелом викидів CO_2 , оскільки процес декарбонізації вапняку спричиняє понад 60% загального обсягу викидів парникових газів у галузі.
8. Важкі метали (Hg , Cd , Pb , Cr) та газоподібні хлориди і фториди накопичуються у виробничих циклах та можуть потрапляти в атмосферу разом із пиловими частинками, становлячи ризик для здоров'я людини.
9. Вплив цементних заводів на водне середовище є обмеженим, але можливе забруднення вод стоками, що містять завислі частинки, масла та підвищену лужність.
10. Для оцінки розповсюдження цементного пилу застосовуються різні математичні моделі, серед яких AERMOD, CALPUFF, ADMS та HYSPLIT, що дозволяють прогнозувати концентрацію забруднюючих речовин у повітрі.
11. Модель AERMOD є найбільш оптимальною для дисертаційного дослідження, оскільки вона забезпечує високу точність у локальних масштабах, враховує метеорологічні умови та вплив рельєфу, що дозволяє ефективно аналізувати поширення забруднень.

II. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА ОПИС МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика об'єкта досліджень

2.1.1. Характеристика навколишнього природного середовища району розміщення об'єкта господарської діяльності

Територія ПрАТ «Івано-Франківськцемент» розташована в геологічно складному регіоні, який знаходиться на межі стикування двох значних структур - Більче-Волинської зони Передкарпатського прогину, що належить до Карпатської складчастої області, та південно-західної окраїни Волино-Подільської плити [44].

Геологічна будова цієї території представлена різновіковими відкладами, що складаються з порід різного літологічного складу. Найдавніші з них належать до крейдової системи (K_2) і виходять на денну поверхню переважно вздовж річкових долин і на схилах межиріч. Відклади верхньої крейди характеризуються платформними фаціями і формують смугу, яка тягнеться вздовж південно-західної частини регіону, прилеглої до Вовчинецького підняття. У цих місцях вони безпосередньо оголюються на денній поверхні, демонструючи важливі геологічні особливості, які впливають на розвиток території [44,45].

Радіологічний фон становить 12 - 15 мкР/год - не перевищує характерного показника для всієї України 10 - 20 мкР/год [45,46].

Територія заводу розташована в межах Передкарпаття, на рівнинній алювіальній рівнині Бистрицької депресії з незначною терасованістю, на висотах від 250 до 300 метрів над рівнем моря. Промисловий майданчик ПрАТ «Івано-Франківськцемент» знаходиться на помірно пересіченій пагорбистій місцевості з ухилом у південно-східному напрямку, приблизно за 4 кілометри на північ від міста Івано-Франківськ. Абсолютні висоти території майданчика варіюються в межах 260 – 300 метрів.

Поверхневі води представлені рікою Дністер та її допливами – Бистрецею-Солотвинською та Надвірнянською. Середньорічний стік річок становить до

200мм, у період весняної повені – до 50 мм, а в період дощових паводків – 10-20 мм [45].

Поверхневий стік від злив у районі території села Ямниця іноді є в 5-8 разів більшим, ніж у неочищених побутових та промислових стоках. Однак загалом якість води в районі розташування підприємства відповідає вимогам водрибогосподарського використання, а декілька кілометрів вище села питному водопостачанню.

Середній рівень мінералізації води у досліджуваному регіоні становить до 100 мг/л, що вказує на її низький вміст розчинених солей. Кількість розчиненого кисню коливається у межах від 2 до 7,2 мг/л, залежно від сезонних змін і місцевих гідрологічних умов. У літній період, зокрема в липні, температура води досягає +22 – 24 °С, що є характерним для теплих сезонів. Взимку, у січні та лютому, спостерігається часткове замерзання водойм, що свідчить про сезонне зниження температури води до критичних позначок, сприятливих для формування льодового покриву [46].

Клімат регіону характеризується помірно-континентальним типом, з теплим літом і м'якою зимою, а також значною кількістю опадів протягом року. Середньорічна температура повітря становить +7,3 °С, що свідчить про помірний кліматичний режим. У літній період, зокрема в липні, максимальна температура досягає +37 °С, тоді як у зимові місяці, зокрема в січні, спостерігається мінімальна температура до -34 °С.

Протягом року переважають вітри західного та північно-західного напрямків, що визначає основний розподіл повітряних мас і впливає на транспорт забруднювачів. Середньорічна швидкість вітру становить 2,9 м/с, що сприяє ефективному розсіюванню шкідливих речовин у повітрі [46,47].

Івано-Франківський обласний центр з гідрометеорології визначив детальні кліматологічні характеристики та коефіцієнти, що враховують умови розсіювання забруднювачів в атмосфері [47]. Дані цих показників наведені у таблиці 2.1, що дозволяє проаналізувати екологічну ситуацію та визначити умови поширення забруднень у регіоні.

Таблиця 2.1

Кліматичні особливості та показники, що впливають на умови розсіювання забруднюючих речовин.

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

Річна кількість опадів становить 788 мм, з яких 615 мм випадає впродовж теплого сезону. Добовий максимум опадів становить 92 мм, середньодобова кількість - 42 мм.

Середньорічна відносна вологість повітря становить 82%. У найтеплішому місяці року середній показник відносної вологості о 13:00 досягає 62%, тоді як у найхолоднішому місяці він зростає до 85% [47].

Ґрунтовий покрив цього регіону відзначається значною різноманітністю та складається з кількох основних типів. Серед них переважають опідзолені чорноземи, які характеризуються високим вмістом гумусу та родючістю. Також тут поширені сірі та темно-сірі опідзолені ґрунти, що мають різний рівень мінералізації та структури, залежно від природних умов і процесів ґрунтоутворення. Така різноманітність ґрунтів впливає на особливості ведення сільського господарства та екологічний стан території [45,46].

Сірі опідзолені ґрунти переважно утворюються на відносно рівнинних ділянках, які мають меншу ступінь розчленованості порівняно з територіями, де поширені світло-сірі ґрунти. Концентрація гумусу в орному шарі варіюється від 1,9% до 3,0%, що свідчить про середній рівень родючості ґрунту. Однак їхня кислотність досить висока - значення рН становить від 4,3 до 4,9, що може створювати певні обмеження для вирощування чутливих до кислотності сільськогосподарських культур [48].

Темно-сірі опідзолені ґрунти сформувалися на лесоподібних суглинках під впливом лісової та лучно-степової рослинності в умовах достатнього рівня зволоження. Вони здебільшого поширені на вододільних рівнинах і активно використовуються для сільськогосподарського обробітку. За своїм механічним складом ці ґрунти належать до легко- або середньосуглинистих. Вміст гумусу в орному шарі становить 2,6 - 2,8%, що забезпечує відносно високу родючість, проте їхній ґрунтовий розчин має середньокислу реакцію, що може впливати на вибір культур для вирощування [49].

Опідзолені чорноземи переважно розташовані на плакорних ділянках та пологих схилах південного напрямку, де рівень ґрунтових вод знаходиться на

значній глибині. Вони утворилися на карбонатних лесоподібних суглинках і відзначаються пилювато-, легко- або середньосуглинистим механічним складом. Ці ґрунти характеризуються найвищим рівнем гумусу серед аналізованих типів, з вмістом у діапазоні 3,4–4,4%. Завдяки слабкокислій реакції ґрунтового розчину вони відзначаються високою родючістю, що робить їх сприятливими для ведення сільськогосподарської діяльності [45].

У прирічкових заплавах зустрічаються дернові та дернові опідзолені ґрунти, сформовані на алювіальних відкладах, переважно з пісків. Ці ґрунти є слабо розвиненими та наймолодшими за віком. Вони вразливі до розмивів і змивів, що створює ризик їх деградації в умовах недостатнього захисту [45,46,49].

Ґрунти, що сформувалися на території ПрАТ «Івано-Франківськцемент», мають різноманітний склад і утворилися на заплавних суглинках та супіщаних відкладеннях першої, другої і частково третьої надзаплавних терас річок Бистриця-Надвірнянська та Бистриця-Солотвинська. Ці ґрунти також трапляються на схилах річкових долин та в районі Вовчинецьких гір. Основними типами ґрунтів у цій місцевості є дерново-підзолисті, поверхнево оглеєні, а також дерново-глеюваті, лучно-опідзолені та мулистоболотні ґрунти. На схилах долин і Вовчинецьких гір переважають дернові ґрунти з різним ступенем кам'янистості - від слабо до сильно кам'янистих. У межах річкових заплав ґрунтовий покрив практично відсутній [46,49].

Серед чинників, що впливають на накопичення або розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері, особливу роль відіграють температурні інверсії, зокрема приземні та припідняті.

Температурна інверсія – це атмосферне явище, при якому відбувається нестандартна зміна температурного градієнта. Замість очікуваного зниження температури з висотою, під час інверсії спостерігається її підвищення. Приземні інверсії формуються поблизу поверхні землі, тоді як припідняті виникають через наявність теплого повітряного шару на певній висоті. Параметри інверсії, такі як товщина та висота залягання, залежать від специфіки місцевого клімату й рельєфу. Це явище значно зменшує турбулентність повітряних потоків, що

ускладнює розсіювання забруднювальних речовин, сприяючи їх накопиченню в нижніх шарах атмосфери та підвищенню рівня забруднення повітря [50].

За даними аерологічної станції у Львові (оскільки на станції Івано-Франківськ такі спостереження не проводяться), приземні інверсії мають високу частоту вночі, низьку - у ранкові та вечірні години, і майже відсутні вдень, становлячи лише 5%. Найвища повторюваність нічних інверсій спостерігається у період з травня по вересень [47,50].

Припідняті інверсії найчастіше виникають у денні та ранкові години, спостерігаючись у кожному другому випадку. Їхня повторюваність знижується у вечірній та нічний час, проте залишається значною, досягаючи 35 - 40%. У нічний період найбільша частота припіднятих інверсій фіксується у серпні та вересні. Найбільш характерними ці інверсії є для холодного періоду року [47,50].

Високий рівень газо- та пилозабруднення атмосферного повітря на території розташування від ПрАТ «Івано-Франківськцемент» завдає значної шкоди фітосфері. Негативному впливу піддаються рослини не тільки в безпосередній близькості до промислового об'єкту, але й далеко за його межами [45,46]. І хоча рослини добре адаптовані, однак вони дуже відчутно реагують на занадто низький або надміру високий вміст окремих компонентів повітря.

Різноманіття біотопів, помірний клімат, наявність значних площ водойм, лісових масивів і відкритих просторів суттєво вплинули на формування фауни та тваринного населення регіону, яке включає як карпатські, так і подільські види [45,46].

2.1.2. Передумови заснування ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» було створено на основі колективного підприємства «Івано-Франківський цементно-шиферний комбінат» згідно з протоколом № 1 від 5 січня 1999 року [51].

У зв'язку з активним розвитком промисловості та цивільного будівництва в 1950–60-х роках виникла значна потреба у підприємствах будівельної індустрії, зокрема цементної промисловості. Івано-Франківську область, а саме село Ямниця, було визначено як найоптимальніше місце для розташування

цементного заводу завдяки багатим покладам вапняку та мергелю, що є основною сировиною для виробництва цементу. Будівництво заводу розпочалося у 1961 році й завершилося у 1964 році [51].

У 1976 році підприємство ввело в експлуатацію трубний цех, який спеціалізувався на виробництві азбестоцементних труб діаметром 100 - 500 мм із загальною напірною потужністю 810 умовних кілометрів на рік.

У 1977 році було запущено технологічну лінію з виробництва плоского шиферу, що розширило асортимент продукції заводу [52].

У 1990 році було розпочато будівництво третьої обертової печі, яку ввели в експлуатацію 5 жовтня 1994 року з нагоди святкування 30-річчя підприємства.

Новий завод, введений в експлуатацію у 2014 році, є високотехнологічним підприємством, обладнаним сучасними системами провідних світових виробників цементного обладнання з Данії, Німеччини та Австрії. Усі виробничі процеси, починаючи від видобутку сировини в кар'єрах і закінчуючи пакуванням цементу в мішки, контролюються за допомогою аналітичної техніки останнього покоління. Завод є не лише найсучаснішим в Україні, але й одним із найкращих у Європі, завдяки використанню енергоефективних і високопродуктивних технологій виробництва [51,52].

Підприємство має вигідне стратегічне розташування, розташоване лише за 7 кілометрів від обласного центру - міста Івано-Франківська. Завод знаходиться майже в центрі умовного півкола з відстанню 150 км до кордону з Польщею, 200 км до Словаччини та Угорщини, а також 150 км до кордонів Румунії та Молдови. Це географічне положення створює сприятливі умови для активної співпраці з цими країнами [52].

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» - це сучасний комплекс виробництва будівельних матеріалів, розташований у селі Ямниця Івано-Франківської області. Основними напрямками діяльності компанії є виробництво цементу, гіпсу та безазбестових волокнистоцементних покрівельних листів. Підприємство виробляє більше трьохсот найменувань продукції, що включають різні види

цементу (портландцемент, шлакопортландцемент), сухі будівельні суміші та залізобетонні вироби [51-53].

Компанія є єдиним виробником безазбестового шиферу в Україні, що використовує нові технології для українського ринку. Важливою частиною діяльності є турбота про довкілля та відповідальне використання природних ресурсів

На підприємстві впроваджено сучасні енергозберігаючі технології та повну автоматизацію виробничих процесів, що забезпечує високу ефективність роботи. Новітні методи контролю якості продукції гарантують відповідність найвищим стандартам, а дотримання екологічних норм робить підприємство одним із лідерів у своїй галузі [53].

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» є унікальним у своїй галузі, адже це єдине підприємство з виробництва цементу в Україні, яке повністю належить українському капіталу. Решта цементних заводів країни перебувають у власності транснаціональних корпорацій, що свідчить про високу зацікавленість міжнародного бізнесу у цій галузі.

Інтерес іноземного капіталу до цементної промисловості України значно зріс наприкінці 1990-х років. Однією з найбільших європейських компаній, яка прагнула закріпитися на українському ринку, була французька група «Лафарж», що на той час була монополістом у виробництві цементу в Європі. Компанія звертала особливу увагу на два найбільші українські заводи – Миколаївський та Івано-Франківський, адже їх придбання дозволило б їй встановити контроль над ринком країни та зміцнити свої позиції у світовому виробництві цементу[51,53].

Однак ПрАТ «Івано-Франківськцемент» змогло реалізувати свою програму розвитку самостійно, використовуючи виключно власні фінансові ресурси та залучаючи кредитні кошти. Такий підхід не лише зберіг незалежність підприємства, але й дозволив йому стати потужним гравцем на українському ринку цементу [52,53].

2.2.Фактори, що впливають на кількість викидів в навколишнє середовище

Утворення забруднюючих речовин на ПрАТ «Івано-Франківськцемент», які викидаються в атмосферне повітря, що відбувається під час [54]:

- переміщення та зберігання сировини;
- сортування, сушки, дроблення сировини;
- випалу клінкеру;
- помелу клінкеру;
- переміщення та зберігання цементу;
- при спалюванні вугільного пилу і пічного палива в печах;
- спалювання альтернативного палива;
- вивантажування, завантаження, дроблення, переміщення гіпсового каменю;
- помелу та сушки гіпсового щебню;
- під час змішування піску, щебню та цементу у бетонозмішувачах;
- прийому, зберігання, відпуску нафтопродуктів;
- механічної обробки деревини;
- при проведенні електрозварювальних і газорізальних робіт;
- при проведенні металообробки на заточному верстаті;
- зберігання та зливу нафтопродуктів;
- зберігання, зливу й відпуску олив і мастил;
- ремонту рухомого складу;
- заміни масел та олив;
- зберігання балонів з пропаном та бутаном;
- роботи компресорів.

Характеристика джерел викидів ПрАТ «Івано-Франківськцемент» наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Опис джерел викидів забруднюючих речовин у процесі цементного
виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент»

№ ч/ч	Джерело викидів		Кількість годин роботи на рік			Параметри газоповітряної суміші на виході із джерела		
		кількість, шт.		висота, м	діаметр, м	швидкість, м/с	обсяг на годину, м ³ /с	температура °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Молоткова дробарка СМ 170 А	1	1842	20	0,5	7,51	1,502	20
2.	Обертова піч №1	1	8139,3	82	2,3	22,72	95,95	160
3.	Обертова піч №2	1	8138,6	82	2,3	22,72	95,95	160
4.	Цементний млин №1	1	6472,8	19	0,3	11,9	2,833	70
5.	Цементний млин №2	1	6523,2	19	0,3	11,8	2,812	70
6.	Цементний млин №3	1	6400	19,7	1,4	5,7	8,75	125
7.	Цементний млин №4	1	6400	19,7	1,4	5,7	8,75	121
8.	Цемсилоси 1,2	2	6523,2	30	0,21	7,82	1,626	32
9.	Цемсилоси 3,4, 5	3	64129,2	30	0,21	7,8	1,617	32
10	Цемсилоси 6, 7, 8	3	6419,7	30	0,21	7,81	1,624	32
11	Транспортер клінкеру	2	8139,3	25	0,3	5,08	0,580	100
12	Цементний бункер	2	1820	30	0,21	8,1	1,62	32
13	Бункер цементних насосів	2	5895	14	0,3	7,8	1,553	32
1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	Обертова піч № 3	1	7813	90	3,6	3,3	33,3	160

15	Транспортер клінкеру	1	7813	25	0,3	7,2	0,51	115
16	Цементний бункер	1	2027	20	0,5	4	1,11	37
17	Склад клінкеру	1	8760	10	0,5	-	0,59	30

В процесі виробництва цементу на підприємстві утворюється так званий виробничий пил, який є дуже небезпечним, як для навколишнього середовища, так і для людей, що безпосередньо працюють на даному виробництві. Виробничий пил являє собою дрібнодисперсні тверді частинки, які можуть тривалий час залишатися у зваженому стані в повітрі. [55].

Такі частинки можуть виникати під час різних виробничих процесів, зокрема дроблення, розмелювання, різання, шліфування, полірування, транспортування, переміщення, пакування сипучих матеріалів, горіння, зварювання тощо. За кількістю речовин, що викидаються в атмосферу, викиди класифікують за 6 групами: не більше 0,01 т/добу; понад 0,01 до 0,1 т/добу; понад 0,1 до 1,0 т/добу; понад 1,0 до 10 т/добу; понад 10 до 100 т/добу; більше 100 т/добу. Фізико-хімічні, механічні та електричні властивості пилу впливають на ефективність роботи фільтрів і визначають напрямки її використання [55]. Частинки пилу, що були вловлені або осіли, зазвичай розглядають як порошок - матеріал із властивостями сипучих речовин. Пил осадових порід містить частинки піску, каоліну, глини, доломіту та вапняку. [54].

Пил осадових порід характеризується високою змочуваністю, яка становить 55 - 97%. Питомий електричний опір цього пилу залежить від рівня вологості й варіюється в межах $4,7 \cdot 10^5$ - $1,3 \cdot 10^8$ Ом·м.

Питомий електричний опір цементного пилу становить $1,5 \cdot 10^7$ - $1,9 \cdot 10^{10}$ Ом·м, що є вищим порівняно з пилом осадових порід. Осадовий пил належить до групи середньої провідності, тоді як цементний пил класифікується як високоомний. Електричний заряд дрібнодисперсних частинок пилу підвищує їхню вибухонебезпечність у повітроочисних системах, а також впливає на адгезійні властивості та сипучість пилу [55]. Використання цементного пилу в якості в'язучого матеріалу вимагає проведення серії випробувань, що пояснюють особливості процесів твердіння цього матеріалу. Цементний пил

твердне в результаті виникнення гідратних новоутворень при взаємодії в'язкої речовини з водою.

На підприємстві ПрАТ «Івано-Франківськцемент» основними джерелами утворення пилу є технологічні процеси та обладнання, що беруть участь у транспортуванні, переробці та випалюванні сировини. Значний внесок у запиленість робочого середовища роблять конвеєрні лінії, які забезпечують переміщення матеріалів і готової продукції, а також місця пересипання, завантаження та розвантаження. Додатковими джерелами пиловиділення є дробильні установки, печі для випалювання клінкеру та кульові млини, що використовуються для його подрібнення. Конвеєри для транспортування сипких матеріалів, зокрема вапняку, поєднують кар'єри з дробильними установками, а рівень запиленості на виробничих майданчиках значною мірою залежить від таких факторів, як сила вітру та відстань між кар'єром і місцем обробки. У процесі роботи пиловиділення може коливатися від мінімальних 7 - 10 г на тонну сировини до максимальних 50 - 52 г/тонну.

Найвищий рівень запиленості спостерігається в бункерному ангарі, де здійснюється розвантаження сировини з автосамоскидів. У таких умовах концентрація пилу може перевищувати гранично допустиму норму (ГДК) у десятки разів. Зокрема, під час подачі сипких матеріалів у бункер через конвеєри рівень запиленості повітря сягає 270 - 450 мг/м³, а при одночасному вивантаженні сировини цей показник може перевищувати 1500 мг/м³. Цей показник суттєво перевищує допустиму норму в 6 мг/м³, що створює серйозні ризики для робочого середовища та вимагає впровадження ефективних методів пилозниження [56].

При використанні сухого способу виробництва цементу кількість сухих запилених газів, що виділяються з печей випалювання клінкеру, на 25 - 40% менша порівняно з мокрим способом. Однак маса дрібнодисперсного пилу, що утворюється, може становити 50 - 120 кг на 1 тонну клінкеру. У сушильних барабанах для сировини й добавок також виділяється пил із підвищеним вологовмістом. Температура точки роси цього пилу сягає 40 - 60 °С, а концентрація аерозолів коливається в межах 15 - 70 г/м³.

Крім того, колосникові холодильники клінкеру виділяють на 1 тунну клінкеру 1,1 - 1,8 тонн сухої газоповітряної суміші, яка містить 7 - 10 кг пилових частинок клінкеру. Ця суміш характеризується високим вмістом великодисперсних частинок, з яких 80% мають розмір понад $5 \cdot 10^{-6}$ м [57].

Аналізуючи джерела пилоутворення на цементному заводі, слід відзначити, що понад 80% пилових викидів в атмосферу припадає на обортові печі, де відбувається випалювання клінкеру [59]. Це підкреслює важливість впровадження ефективних систем пиловловлення для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Таблиця 2.3. містить перелік джерел утворення пилових викидів у цементному виробництві, а також типи та марки фільтрів, що використовуються для їх очищення. Для всіх етапів виробництва, включаючи млини домолу, обортову піч, холодильники для клінкеру, цементні та вугільні млини, застосовуються вискоєфективні фільтраційні системи, серед яких Scheuch, FLS, AIRCOM, Donaldson та інші. Ступінь очищення більшості фільтрів досягає 98-99,99%, що свідчить про ефективне зниження викидів пилу та забруднювачів у атмосферу. Рукавні фільтри, які забезпечують ефективність очищення до 99,99%, відіграють ключову роль у зменшенні техногенного впливу цементного виробництва на довкілля.

Таблиця 2.3.

Перелік типів та моделей основних джерел утворення викидів на ПрАТ
“Івано-Франківськцемент”

Джерело утворення	Тип, марка фільтру	Ступінь очистки
1	2	3
Млини домолу	EFV-1-2.4-36-C2-D4	
	Scheuch	99%
	Scheuch	99%
1	2	3

Обертова піч	F400/H2P1/1*40+2*45- 1*72120/1C/1K/L1D	
	1F400/H2P1/3x40- 1x88135/1K/1K/L/L2D	
	FLS FC-TD / PJ / 3312 / 10x127 / ((12x2)x23) x(1x1) / 6 /P4/6PC/6A	
Холодильник для клінкеру	ЕГА 1-30-7,5-4-4	
	EKK2-16-6,75 3(3,2+3,84+3,2)-12- D-L EKK1-16-8,25-3(2,56+3,2+2,56)-12- D-L	
	FLS FC-TD / PJ / 3312 / 10x127 / ((12x2)x23) x (1x1) / 6 /P4/6PC/6A	
Цементні млини	МФУ-108	
	МФУ-108	
	Scheuch	99%
	Scheuch	99%
	Scheuch	99%
	Scheuch	99%
	Scheuch	
	AIRCOM 216/2,5	
	Scheuch	99%
	Scheuch	99%
	Scheuch	99%
Вугільні млини	BETUPULS	98-99%
	FLS	98-99%
	UC-C / PJ / 960 / 4,8x160 / (20x12) x 1 x 4 / 1	
1	2	3

Сушильні барабани вугілля	AIRCOM-504/3,0	
	Фабрика рукавних фільтрів	
Сушильні барабани додатків	EKK2-16-6,75 3(3,2+3,84+3,2)-12-D-L	
	ILD Group	
Рукавні фільтри	серії GAL-GLk компанії «Агрікон»	99%
Рукавні фільтри	серії DLMV компанії Donaldson	99,99%
Рукавні фільтри	ФРІР	99%

Однією з найбільш актуальних проблем цементного виробництва є необхідність зменшення концентрації дрібнодисперсних частинок пилу, які становлять значну загрозу для здоров'я людини. На відміну від крупних частинок пилу, які швидко осідають і майже не впливають на організм, дрібнодисперсні частинки здатні проникати в легені, порушуючи їхню роботу та спричиняючи серйозні захворювання [57,58].

З метою зменшення негативного впливу на навколишнє середовище підприємство запровадило передові технології очищення повітря. Було встановлено 39 одиниць вискоєфективного газоочисного обладнання, яке забезпечує зниження концентрації твердих частинок у відхідних газах до рівня 20–25 мг/м³. Це значно перевищує екологічні вимоги щодо чистоти повітря, оскільки нормативи Європейського Союзу встановлюють граничне значення у 30 мг/м³. Таким чином, впроваджені заходи сприяють зменшенню промислового забруднення та відповідають сучасним екологічним стандартам.

Всі викиди від технологічних операцій спочатку проходять через рукавні фільтри, що ефективно видаляють тверді частинки, і лише після цього потрапляють у навколишнє середовище. Такий підхід забезпечує дотримання вимог наказу від 20.01.2009 №23 щодо допустимих концентрацій викидів з устаткування для виробництва цементного клінкеру [53].

Важливим заходом у сфері охорони довкілля є герметизація всіх виробничих процесів, транспортних систем та комунікацій, що дозволяє

запобігти перевищенню допустимих рівнів забруднення та забезпечити стабільність технологічного процесу. Фахівці екологічного відділу підприємства здійснили детальну оцінку впливу виробничих операцій на стан атмосферного повітря. За підсумками розрахунків встановлено, що концентрації забруднюючих речовин, враховуючи фонове забруднення, не перевищують встановлені граничні значення, визначені наказом МОЗ від 14.01.2020 №52, що свідчить про ефективність впроваджених екологічних заходів.

Для зменшення впливу на атмосферне повітря на цементному заводі впроваджуються такі екологічні заходи:

а) до технологічних процесів захисту відносять:

- регулярний моніторинг стану рукавних фільтрів та забезпечення герметичності розподільного обладнання;
- відключення двигунів автотранспорту під час тимчасових зупинок;
- забезпечення контролю за викидами та запахами, щоб вони не завдавали дискомфорту та не мали значного впливу на навколишнє середовище;
- дотримання технологічних норм для підтримання оптимальних умов виробничого процесу;
- оператори мають підтримувати параметри технологічних процесів (температура, тиск тощо) у встановлених межах;
- регулярна перевірка герметичності устаткування, а у разі виявлення несправностей – негайне їх усунення;
- підтримка всього обладнання у технічно справному стані та контроль за правильністю роботи вимірювальних приладів;
- виконання протипожежного режиму відповідно до «Правил пожежної безпеки в Україні».

б) до устаткування і споруд:

- технологічні операції з сировиною проводяться виключно в закритих приміщеннях для запобігання наднормативним викидам забруднюючих речовин;
- встановлення газоочисного обладнання (рукавних фільтрів), яке забезпечує дотримання нормативів ГДК на межі житлової забудови;

- підтримка вентиляційних установок у справному стані;
- обслуговування обладнання згідно з технічними паспортами та чинною нормативною документацією;
- забезпечення робочого стану систем сигналізації для попередження про відхилення технологічних параметрів.

Сукупність впроваджених заходів на ПрАТ «Івано-Франківськцемент» спрямована на мінімізацію впливу виробництва на довкілля. Завдяки високоефективному газоочисному обладнанню, постійному контролю технологічних процесів і дотриманню екологічних стандартів, підприємство забезпечує відповідність найвищим вимогам екологічної безпеки та охорони здоров'я населення.

2.3. Аналіз якості повітря

2.3.1. Пристрій AirFresh для вимірювання якості повітря

Пристрій AirFresh призначений для моніторингу якості повітря, розроблений у рамках громадської ініціативи EcoCity (рис.2.1.) [60].



Рис. 2.1. - Пристрій для моніторингу якості повітря

Пристрій AirFresh є найбільш доступною станцією моніторингу за простотою використання, що робить її придатною для широкого впровадження серед населення. Пристрій забезпечує точне вимірювання основних параметрів забруднення повітря, а також метеорологічних показників, таких як температура,

вологість та атмосферний тиск. Це дозволяє отримувати комплексну інформацію про стан навколишнього середовища у будь-який момент.

Пристрій обладнано високоточним пиломіром, який здатний визначати концентрацію трьох фракцій дрібнодисперсного пилу: PM1, PM2.5 і PM10. Для підвищення точності вимірювань у змінних погодних умовах, зокрема під час туману, станція доповнена автоматичним термокомпенсаційним модулем. Завдяки цій технології вплив зовнішніх факторів на результати моніторингу мінімізується, що гарантує високу точність отриманих даних та надійність екологічного контролю.

AirFresh розроблено з урахуванням потреб користувачів, тому її монтаж максимально спрощений і може бути виконаний у будь-якому зручному місці. Завдяки компактній конструкції та продуманому дизайну, станція легко встановлюється на балконах, фасадах будівель, стовпах чи інших доступних ділянках. Це значно полегшує впровадження системи моніторингу в житлових районах, комерційних об'єктах та громадських місцях.

Відмінною характеристикою AirFresh є наявність автоматичного термокомпенсаційного модуля, що забезпечує попереднє нагрівання повітря перед його надходженням у пиломір. Ця функція активується при відносній вологості понад 70%, що є особливо актуальним у туманну погоду, коли дрібнодисперсні частинки води можуть впливати на точність показників. Розігрівання повітря дозволяє значно зменшити похибку вимірювання, спричинену високою вологістю, завдяки зменшенню кількості конденсованих частинок води в повітряному потоці.

Хоча термокомпенсаційний модуль допомагає частково нівелювати вплив вологості, повністю усунути похибку за умов туману неможливо. Для цього повітря повинно проходити через термозонд значної довжини, який одночасно нагріває і осушує його. Однак такі термозонди є складними у конструкції та дорогими, тому їх використання обмежене спеціалізованими лабораторними приладами. Більшість громадських пиломірів, включаючи AirFresh, не пристосовані для подібного обладнання.

Попри зазначені обмеження, AirFresh залишається оптимальним рішенням для громадського моніторингу повітря. Інтеграція термокомпенсаційного модуля дозволяє досягти високої точності вимірювання навіть у несприятливих умовах, забезпечуючи користувачів важливою екологічною інформацією. Завдяки своїй доступності, розширеній функціональності та простоті використання, ця станція є ефективним інструментом для масового впровадження та підвищення екологічної обізнаності населення.

Сенсор температури, вологості та тиску у станції AirFresh розташований зовні пристрою та термоізований від нагрівання пилеміра. Така конструкція дозволяє мінімізувати похибки у вимірюваннях температури та вологості, які могли б виникати під час розігріву пилеміра.

Показник PM2.5 характеризує вміст твердих частинок у повітрі, діаметр яких не перевищує 2.5 мікрметра. Вони мають настільки малий розмір, що можуть бути помітні тільки за допомогою мікроскопа. Завдяки своїм невеликим розмірам, вони безперешкодно проникають глибоко в дихальні шляхи, уникаючи захисних систем організму. Організм людини не здатний ефективно блокувати PM2.5, що дозволяє цим частинкам проникати вглиб тіла, завдаючи значної шкоди здоров'ю. Крім того, PM2.5 довше затримуються у повітрі та можуть переноситися вітром на більші відстані у порівнянні з PM10. Основним джерелом таких частинок є спалювання різних видів палива.

PM10, у свою чергу, представляє тверді частинки діаметром до 10 мікрметрів. Хоча вони більші за PM2.5, їх розмір все ще дозволяє легко проникати у дихальні шляхи. Ці частинки викликають подразнення слизової оболонки очей, сухість у горлі та особливо небезпечні для людей, які страждають на астму або хронічні захворювання дихальних шляхів. Проте, на відміну від PM2.5, організм більш ефективно справляється з PM10 завдяки захисним механізмам: дрібні волоски вздовж дихальних шляхів затримують частину цих частинок, а кашель і чхання допомагають їх виводити.

PM2.5 є значно шкідливішими для здоров'я порівняно з PM10. Це зумовлено не тільки їх здатністю проникати глибше у дихальні шляхи, але й

тривалістю перебування в повітрі. Частинки PM10 можуть залишатися в повітрі від кількох хвилин до кількох годин, тоді як PM2.5 здатні затримуватися на кілька днів або навіть тижнів, залежно від погодних умов.

Частинки PM1 мають діаметр до 1 мікрометра та є ще дрібнішими, ніж PM2.5. Вони мають схожі властивості, однак через свої надзвичайно малі розміри їх складніше вимірювати та фільтрувати. Для цієї категорії частинок зазвичай застосовуються стандарти, що використовуються для PM2.5.

Основні технічні характеристики пристрою AirFresh:

- діапазон вимірювання PM10 та PM2.5: 0 - 999 мкг/м³ ;
- точність вимірювання PM10 та PM2.5: $\pm 1\%$;
- діапазон вимірювання температури: від -40 до +85 °C;
- точність вимірювання температури: ± 0.5 °C (за умови температури 25 °C);
- діапазон вимірювання відносної вологості: 0 - 100%;
- точність вимірювання відносної вологості: $\pm 2\%$;
- діапазон вимірювання атмосферного тиску: 300 - 1100 гПа;
- точність вимірювання атмосферного тиску: ± 0.03 гПа.

Розміри пристрою: зазначені на рисунку 2.2.

Станцію контролю якості повітря можна встановлювати на будь-які поверхні, незалежно від їхньої текстури та матеріалу. Завдяки універсальному кріпленню вона легко монтується як на гладкі, так і на шорсткі основи. У комплекті передбачена промислова клейка стрічка, що забезпечує високу стійкість до відриву та зсуву, витримуючи навантаження від 30 до 60 кг. Це дозволяє надійно закріплювати пристрій на поверхнях із шорсткістю до 0,5 мм, включаючи такі матеріали, як скло, пластик, дерево, гіпсокартон, гладкі стіни та металочерепиця.



Рис.2.2. – Пристрій для моніторингу якості повітря на відкритому повітрі, оснащений системою термокомпенсації

Для монтажу на складніші основи, такі як бетон, цегла чи необроблена деревина, в комплекті передбачені спеціальні дюбелі діаметром 6 мм. Вони гарантують міцне кріплення станції та стабільність її роботи навіть у складних експлуатаційних умовах. Таким чином, установка пристрою є швидкою, зручною та адаптованою до різних середовищ.

2.3.2. Результати вимірювання

Метою даного дослідження є визначення рівнів забруднення атмосферного повітря твердими частинками різних фракцій (PM1, PM2,5 та PM10) у зоні впливу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» шляхом проведення цілодобових вимірювань концентрацій даних забруднювачів у двох контрольних точках – с. Клузів та с. Ямниця (рис. 2.3.) – протягом робочого дня з 8:00 до 20:00. Такий часовий проміжок дозволяє охопити період активної роботи підприємства та врахувати можливі викиди під час пікових виробничих навантажень.

Отримані дані будуть використані для розрахунку індексу якості повітря (AQI, Air Quality Index) – це інтегральний показник, що характеризує ступінь забруднення атмосферного повітря та його потенційний вплив на здоров'я людини [61,63], що дозволить об'єктивно оцінити рівень забруднення та потенційні ризики для здоров'я населення, яке проживає поблизу підприємства.



Рис.2.3. – Карта місцевості з позначеними точками спостереження

На основі отриманих даних було побудовано графіки (рис. 2.4. - 2.9.), які відображають зміну концентрацій PM_{10} , $PM_{2.5}$ та PM_{10} у часі. Це дозволяє проаналізувати добові коливання рівня забруднення та виявити періоди максимального та мінімального навантаження на довкілля.

Для оцінки якості повітря отримані значення порівнювалися з міжнародними стандартами. У таблицях 2.4. і 2.5. наведено порогові значення для твердих частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10} , які використовуються у багатьох системах оцінки індексу якості повітря (AQI) [61]. Ці значення дозволяють класифікувати рівень забруднення та оцінити його потенційний вплив на здоров'я населення.

Таблиця 2.4.

Порогові значення для PM2.5

PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	AQI	Якість повітря	Вплив на здоров'я
1	2	3	4
0-12	0-50	Добре	Немає значного ризику
12.1-35.4	51-100	Задовільне	Можливий дискомфорт для чутливих груп
35.5-55.4	101-150	Помірно забруднене	Небезпечно для чутливих груп
55.5-150.4	151-200	Шкідливе	Небезпечно для всіх
150.5-250.4	201-300	Дуже шкідливе	Серйозні ризики для здоров'я
250.5+	301+	Небезпечне	Загроза для всього населення

Таблиця 2.5.

Порогові значення для PM10

PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	AQI	Якість повітря	Вплив на здоров'я
1	2	3	4
0-54	0-50	Добре	Немає значного ризику
55-154	51-100	Задовільне	Можливий дискомфорт для чутливих груп
155-254	101-150	Помірно забруднене	Небезпечно для чутливих груп

1	2	3	4
255-354	151-200	Шкідливе	Небезпечно для всіх
355-424	201-300	Дуже шкідливе	Серйозні ризики для здоров'я
425+	301+	Небезпечне	Загроза для всього населення

Окремих міжнародних стандартів для оцінки якості повітря за фракцією PM1 на сьогодні не існує, оскільки цей показник менш поширений у регламентованих системах моніторингу. Водночас, у науковій літературі наголошується, що дрібнодисперсні частинки PM1 є особливо небезпечними для здоров'я, оскільки здатні проникати в альвеоли легень та потрапляти в кровоносну систему. Тому отримані значення PM1 у цьому дослідженні є важливим доповненням до аналізу стану повітря, особливо у контексті впливу цементного виробництва [62].

Розрахунок AQI для кожної точки здійснюється за принципом визначення найвищого субіндексу серед отриманих значень PM2.5 та PM10. Це дозволяє оцінити загальний рівень забруднення повітря та дати рекомендації щодо зниження його впливу на населення [61].

У результаті проведеного моніторингу концентрацій твердих частинок PM1, PM2.5 та PM10 у двох контрольних точках (с. Клузів та с. Ямниця) було виявлено коливання рівня забруднення повітря протягом робочого дня. Годинні середні значення концентрацій дозволяють визначити періоди пікових навантажень, тобто часові інтервали, коли рівень забруднення є найбільш високим.



Рис. 2.4. – Добові зміни концентрації частинок пилу РМ 1 в с. Клузів

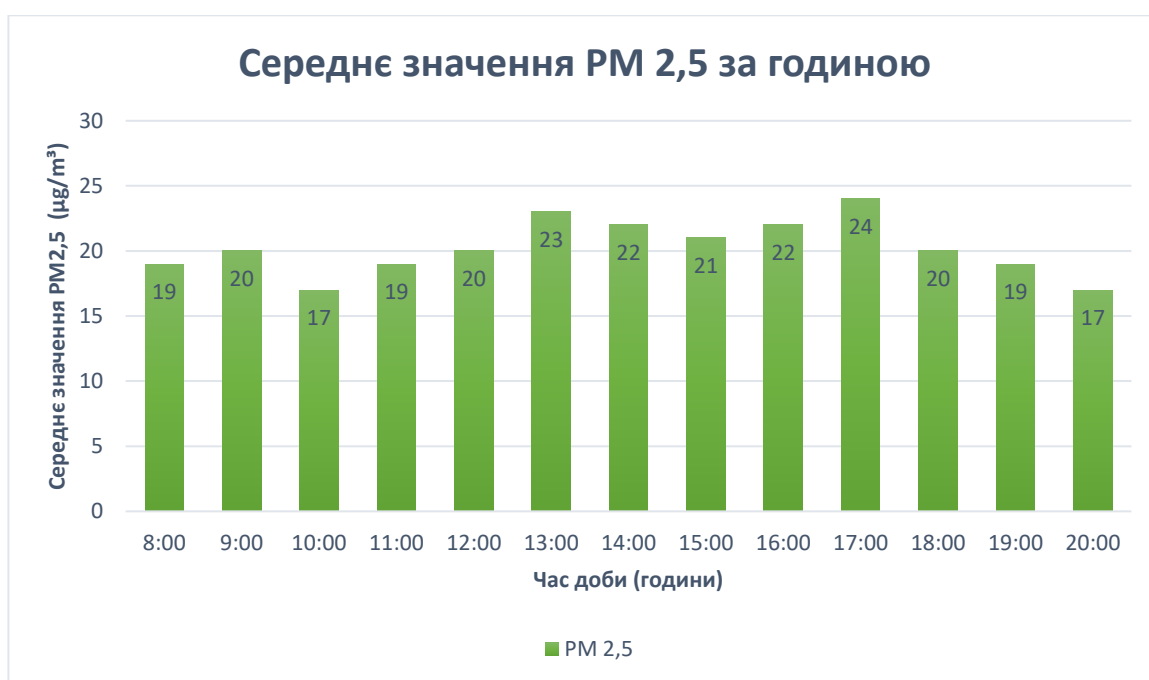


Рис. 2.5. – Добові зміни концентрації частинок пилу РМ 2,5 в с. Клузів



Рис.2.6. – Добові зміни концентрації частинок пилу РМ 10 в с. Клузів



Рис.2.7. – Добові зміни концентрації частинок пилу РМ 1 в с. Ямниця



Рис. 2.8.– Добові зміни концентрації частинок пилу РМ 2,5 в с. Ямниця



Рис.2.9. – Добові зміни концентрації частинок пилу РМ 10 в с. Ямниця

На рисунках 2.10. і 2.11. (графіки) зображено зміну концентрацій твердих частинок РМ1, РМ2.5 та РМ10 у часі. Графік ілюструє динаміку забруднення від початку робочого дня (08:00) до його завершення (20:00).

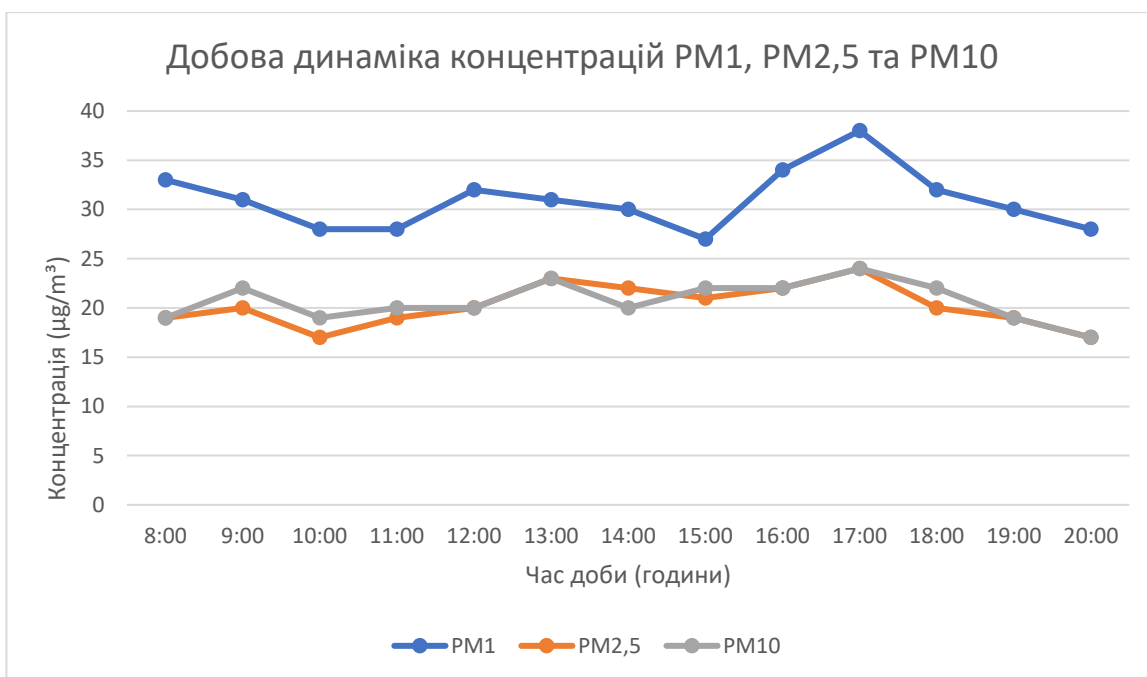


Рис. 2.10. – Добова динаміка концентрацій PM1, PM2,5 та PM10 у с. Клузів

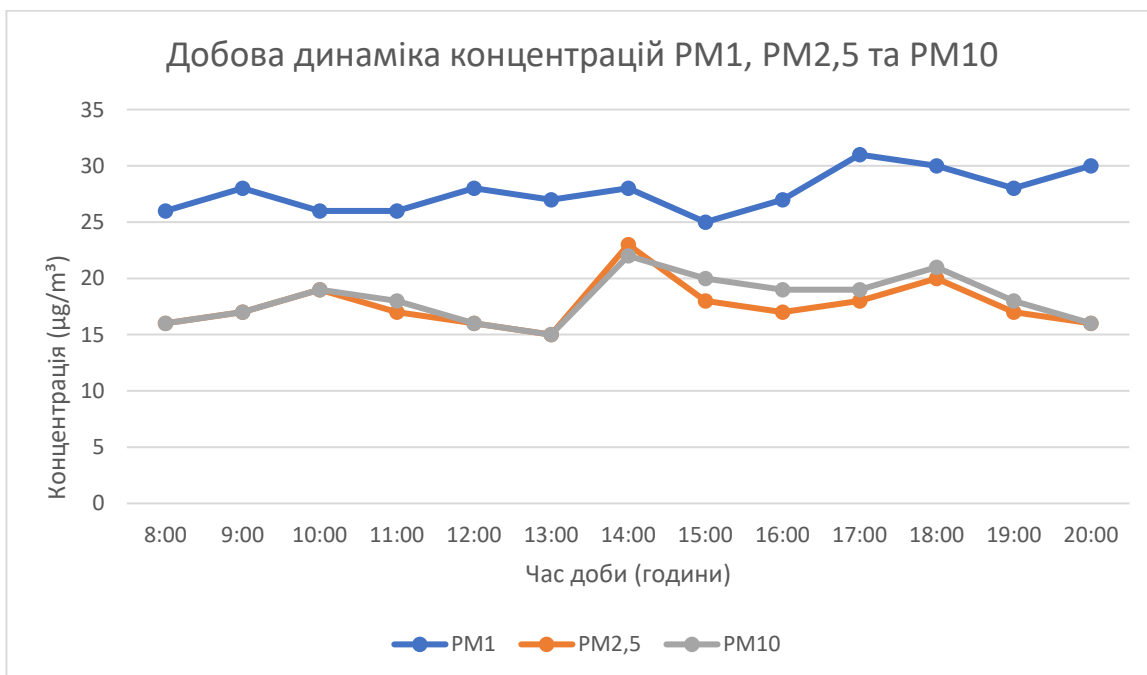


Рис. 2.11.– Добова динаміка концентрацій PM1, PM2,5 та PM10 у с. Ямниця

Аналізуючи графічні дані концентрації PM1 упродовж усього дня стабільно перевищують рівні PM2.5 та PM10. Це свідчить про значну присутність найдрібніших частинок, які за своїми розмірами менші за 1 мікромметр. Така особливість є характерною для зон, що знаходяться під впливом

цементного виробництва, де у процесі виробництва, транспортування та зберігання сировини утворюються саме такі частинки.

В обох точках (с. Клузів та с. Ямниця) спостерігаються чітко виражені піки концентрацій. Перший піковий період – близько 14:00. Ймовірно, він пов'язаний з інтенсивними технологічними процесами або підвищеною активністю транспорту. Другий піковий період – близько 17:00-18:00. Може бути спричинений додатковими викидами з виробництва у другій половині дня, а також погіршенням розсіювання через зниження швидкості вітру у вечірній час.

Концентрації PM2.5 та PM10 протягом дня змінюються майже синхронно, що свідчить про їхнє спільне джерело походження. Основним джерелом цих частинок у зоні дослідження, з високою ймовірністю, є діяльність ПрАТ «Івано-Франківськцемент», зокрема процеси транспортування, завантаження та вивантаження сировини, а також технологічні викиди з виробничих цехів. Додатковий внесок у забруднення можуть вносити автомобільний транспорт та місцеві будівельні роботи. Водночас, динаміка концентрацій PM1 демонструє дещо інші коливання, що може свідчити про специфічні джерела найдрібніших частинок, пов'язані саме з виробничими процесами цементного заводу, такими як дроблення сировини, помел клінкеру, зберігання та пакування цементу, які супроводжуються утворенням та викидом значної кількості дрібнодисперсного пилу.

Після 18:00 у більшості випадків фіксується тенденція до зниження концентрацій всіх фракцій (PM1, PM2.5 та PM10). Це може бути безпосередньо пов'язано зі зменшенням виробничої активності на ПрАТ «Івано-Франківськцемент» у вечірні години, коли основні технологічні процеси або зупиняються, або переходять у менш інтенсивний режим. Додатково, зниження транспортного навантаження від підприємства (зменшення руху вантажного транспорту) та покращення метеорологічних умов у вечірній час сприяють більш ефективному розсіюванню пилових частинок в атмосфері.

У другій точці (с. Ямниця) рівні PM1 є вищими, ніж у першій точці (с. Клузів), що може бути пов'язано з ближчим розташуванням с. Ямниця до

основних джерел викидів ПрАТ «Івано-Франківськцемент», зокрема до виробничих цехів та майданчиків для зберігання сировини й готової продукції. Також важливими чинниками можуть бути менша провітрюваність території через особливості рельєфу та забудови, що створює передумови для накопичення дрібнодисперсного пилу, особливо в умовах слабкого вітру або температурних інверсій.

Хоча середньодобові значення PM2.5 та PM10 загалом не перевищують критичних порогів, короточасні пікові концентрації, що фіксуються упродовж робочого дня, особливо під час запуску чи інтенсифікації виробничих процесів на ПрАТ «Івано-Франківськцемент», можуть створювати підвищені ризики для здоров'я чутливих груп населення - дітей, літніх людей та осіб із хронічними захворюваннями дихальної системи.

Зафіксовані у ході дослідження тренди забруднення, а саме - ранкові та вечірні піки концентрацій, чітко співвідносяться із виробничою діяльністю ПрАТ «Івано-Франківськцемент».

2.3.3. Розрахунок індексу якості повітря (AQI) для точок спостереження у с. Клузів та с. Ямниця.

Індекс якості повітря (AQI) для кожного окремого забруднювача (PM2.5, PM10 тощо) розраховується за формулою лінійної інтерполяції (1) [61]:

$$I = \frac{(C - C_{low})}{(C_{high} - C_{low})} \times (I_{high} - I_{low}) + I_{low} \quad (1)$$

де I - розрахований субіндекс для конкретного забруднювача (наприклад, PM2.5 або PM10);

C - виміряна концентрація цього забруднювача ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

C_{low} - нижня межа концентрації, до якої належить C ;

C_{high} - верхня межа концентрації, до якої належить C ;

I_{low} - нижня межа індексу AQI для цього діапазону концентрацій;

I_{high} - верхня межа індексу AQI для цього діапазону.

Після розрахунку субіндексу для PM_{2.5} та PM₁₀, загальний індекс якості повітря визначається як максимум із цих двох субіндексів:

$$AQI = \max(I_{PM_{2.5}}, I_{PM_{10}}) \quad (2)$$

Це підхід "найгіршого показника" - загальний індекс відповідає показнику, який має гірший стан (вищий субіндекс).

PM₁ (частинки розміром до 1 мкм) не включається до класичного AQI. Оскільки на міжнародному рівні немає узгоджених порогових значень та шкали AQI для PM₁, ці дані можуть використовуватись додатково для аналізу, але вони не впливають на обчислення стандартного AQI.

У таблиці 2.6. наведені середні значення концентрації показників PM_{2.5} та PM₁₀ для розрахунку індексу якості повітря (AQI).

Таблиця 2.6.

Дані для розрахунку індексу якості повітря (AQI)

Середнє значення	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
с. Клузів	20	21
с. Ямниця	18	18

Розраховуємо субіндекс за формулою 1 для PM_{2.5} = 20 µg/m³ (с. Клузів). Згідно з табл. 2.4. AQI для PM_{2.5} (µg/m³): 20 потрапляє в діапазон 12.1 - 35.4, відповідний діапазон AQI 51-100.

$$I = \frac{(20 - 12,1)}{(35,4 - 12,1)} \times (100 - 51) + 51 = 66,6$$

Субіндекс PM_{2.5} для точки с. Клузів = 67 (Задовільне повітря).

Розраховуємо субіндекс за формулою 1 для PM_{2.5} = 18 µg/m³ (с. Ямниця). Згідно з табл. 2.4. AQI для PM_{2.5} (µg/m³): 18 потрапляє в діапазон 12.1 - 35.4, відповідний діапазон AQI 51-100.

$$I = \frac{(18 - 12,1)}{(35,4 - 12,1)} \times (100 - 51) + 51 = 63,4$$

Субіндекс PM_{2.5} для точки с. Ямниця = 63 (Задовільне повітря).

Розраховуємо субіндекс за формулою 1 для $PM_{10} = 21 \mu g/m^3$ (с. Клузів). Згідно з табл. 2.5. AQI для PM_{10} ($\mu g/m^3$): 21 потрапляє в діапазон 0 - 54, відповідний діапазон AQI 0-50.

$$I = \frac{(21 - 0)}{(54 - 0)} \times (50 - 0) + 0 = 19,4$$

Субіндекс PM_{10} для с. Клузів = 19 (Добре повітря).

Розраховуємо субіндекс за формулою 1 для $PM_{10} = 18 \mu g/m^3$ (с. Ямниця). Згідно з табл. 2.5. AQI для PM_{10} ($\mu g/m^3$): 18 потрапляє в діапазон 0 - 54, відповідний діапазон AQI 0-50.

$$I = \frac{(18 - 0)}{(54 - 0)} \times (50 - 0) + 0 = 16,7$$

Субіндекс PM_{10} для с. Ямниця = 17 (Добре повітря).

За формулою 2 визначаємо загальний AQI (визначається як найбільший субіндекс) для двох точок спостереження.

Точка спостереження с. Клузів: $AQI = \max(67, 19) = 67$ (задовільне повітря).

Точка спостереження с. Ямниця: $AQI = \max(63, 17) = 63$ (задовільне повітря).

Отже, на основі проведених вимірювань концентрацій твердих частинок фракцій $PM_{2.5}$ та PM_{10} у двох контрольних точках - с. Клузів та с. Ямниця - було розраховано індекс якості повітря (AQI) для кожної точки. Розрахунок здійснено за міжнародно прийнятою методикою, яка передбачає визначення окремих субіндексів для $PM_{2.5}$ та PM_{10} , з подальшим вибором найбільшого значення як загального індексу якості повітря.

За результатами розрахунків, у с. Клузів середньодобовий індекс якості повітря становить 67, що відповідає категорії «Задовільне» (51-100). У с. Ямниця середньодобовий AQI становить 63, що також відноситься до категорії «Задовільне».

Згідно з міжнародною шкалою AQI , повітря, яке відповідає даній категорії, не становить значної загрози для здорових людей. Водночас, для окремих категорій населення, які належать до чутливих груп, таких як: діти, літні люди, особи із хронічними захворюваннями органів дихання (бронхіти, астма), особи із серцево-судинними захворюваннями, тривале перебування на відкритому

повітрі у таких умовах може викликати незначний дискомфорт. Це може проявлятися у вигляді: подразнення слизових оболонок, незначного кашлю або першіння в горлі, задишки при фізичних навантаженнях, посилення симптомів у людей із хронічними хворобами дихальної системи.

Отримані результати є важливою основою для розробки цільових заходів із зменшення викидів пилу та підвищення рівня захисту здоров'я населення, яке проживає у зоні впливу підприємства.

Висновки до розділу 2.

1. Територія ПрАТ «Івано-Франківськцемент» знаходиться в геологічно складному регіоні Передкарпаття, що впливає на особливості його екологічного стану. Клімат характеризується помірно-континентальними умовами, з теплим літом і м'якою зимою. Основні гідрографічні об'єкти регіону - річка Дністер та її притоки, які забезпечують водопостачання та впливають на екологічні умови території.

2. Основні джерела утворення забруднюючих речовин на підприємстві пов'язані з технологічними процесами, такими як випал клінкеру, помел цементу, транспортування та зберігання сировини. Викиди включають пилові частинки, газоподібні сполуки та продукти спалювання палива.

3. Для зниження рівня забруднення атмосфери використовується сучасне газоочисне обладнання, зокрема рукавні фільтри, що забезпечують ефективність очищення на рівні 98-99,99%. Встановлені фільтраційні системи Scheuch, FLS, AIRCOM та Donaldson відповідають сучасним екологічним стандартам.

4. Моніторинг повітря у двох контрольних точках (с. Клузів та с. Ямниця) показав, що рівень забруднення твердими частинками PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀ змінюється протягом дня. Найвищі концентрації спостерігаються в періоди активної роботи виробництва о 14:00 та 17:00-18:00 год..

5. Розрахунок AQI показав, що в с. Клузів середньодобове значення індексу становить 67, а в с. Ямниця – 63, що відповідає категорії «Задовільне». Це означає, що рівень забруднення не є критичним для здорового населення, але

може викликати дискомфорт у чутливих груп населення (дітей, людей похилого віку, осіб із захворюваннями дихальної системи).

6. Аналіз добових змін забруднення підтвердив, що основним джерелом частинок PM_{2.5} та PM₁₀ є діяльність ПрАТ «Івано-Франківськцемент». Спостерігається підвищена концентрація найдрібніших частинок (PM₁), що може бути пов'язано із дробленням сировини, помелом клінкеру та іншими процесами.

7. Впровадження додаткових заходів для зменшення викидів, зокрема посилення контролю над процесами пилогазоочищення, герметизація виробничих процесів та використання передових технологій, дозволить знизити рівень забруднення. Моніторинг повітря має продовжуватися для оцінки динаміки змін та підвищення екологічної безпеки регіону.

ІІІ. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ ПрАТ “ІВАНО-ФРАНКІВСЬКЦЕМЕНТ” НА ПОВІТРЯНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

3.1. Математичне моделювання процесів розповсюдження забруднюючих речовин у повітряних потоках

Дослідження провідних науковців [64,65] підтверджують, що забруднення нижніх шарів атмосфери пиловими частинками становить серйозну загрозу як для екологічної рівноваги, так і для здоров'я людини. Тверді частинки пилу, залежно від їхнього розміру, складу та джерела походження, можуть впливати на організми та екосистеми різними шляхами [66-68].

Мікроскопічні частинки діаметром менше 10 мкм (PM10) здатні проникати у верхні та нижні дихальні шляхи людини. Як зазначено у дослідженні [69] такі частинки викликають запальні процеси, які можуть призводити до хронічних захворювань легенів, включаючи астму та бронхіт. Ще небезпечніші ультрадисперсні частинки (PM2.5), які через свою малу масу можуть проникати не лише в легені, а й в кровоносну систему, спричиняючи серцево-судинні хвороби та порушення обміну речовин. Дослідження [70] підтверджують, що тривале перебування в умовах підвищеної концентрації PM2.5 підвищує ризик смертності від серцево-судинних хвороб на 20%. Окрім того, ці частинки негативно впливають на розвиток дихальної системи у дітей, що підвищує ризик розвитку алергічних захворювань у майбутньому.

Пилові частинки не лише шкодять здоров'ю людини, але й впливають на клімат, змінюючи процеси формування хмар та зменшуючи інтенсивність сонячного випромінювання, яке досягає земної поверхні. Це може спричинити локальні кліматичні зміни, включно зі зменшенням урожайності сільськогосподарських культур через зниження фотосинтетичної активності рослин [71].

Також пил, який переноситься на великі відстані, може містити токсичні речовини, включаючи важкі метали, поліароматичні вуглеводні та органічні забруднювачі, які, потрапляючи на ґрунти та водні об'єкти, погіршують їх якість і створюють загрозу для біорізноманіття [71].

Зменшення пилового забруднення потребує комплексних підходів, включаючи контроль промислових викидів, озеленення міських зон та підвищення ефективності систем очищення повітря [66-68].

Для створення математичної моделі процесу поширення дрібнодисперсного пилу застосовуємо диференціальне рівняння дифузійного перенесення. Це рівняння дозволяє описати, як змінюється концентрація пилових частинок у тривимірному просторі залежно від часу [72]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \sigma^* C = \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \mu^* \nabla^2 C + k, \quad (3.1.)$$

де u, v, w – характеристики швидкості вітру вздовж осей декартової системи координат., м/с;

μ^* – коефіцієнт горизонтального поширення в площині $(x, 0, y)$, м²/с;

σ^* – величина, що характеризує процес трансформації речовини, с-1;

γ – коефіцієнт вертикального поширення вздовж осі z , м²/с.

Добуток оператора Лапласа (диференціальний оператор другого порядку, що застосовується у багатьох галузях фізики, математики та інженерії для аналізу різних явищ) на концентрацію при цьому розраховується за наступною залежністю:

$$\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (3.2.)$$

k – Параметр джерела, який змінюється залежно від координат і часу, $k = f(x, y, z, t)$.

Згідно з дослідженнями авторів [73,74], для розв'язання одновимірної задачі моделювання розповсюдження дрібнодисперсного пилу в атмосфері застосовується спрощена форма рівняння 3.1.. При цьому передбачається, що

перенесення твердих частинок в атмосфері відбувається у нескінченному середовищі, тобто за умови $-\infty < x < \infty$.

З урахуванням метеорологічних даних щодо характеристик вітрового навантаження, а також за умови стаціонарного характеру навантаження на атмосферу, рівняння 3.1. приймає наступний вигляд:

$$u \frac{dC}{dx} + \sigma^* C = \mu^* \frac{d^2 C}{dx^2} + Q \delta(x - x_0) \quad (3.3.)$$

де Q – потужність джерела, яке викидає пил в атмосферу, $кг/с$;

$\delta(x - x_0)$ – дельта-функція Дірака, яка відображає інтегральний вміст пилових частинок, що дифундують у повітряному об'ємі за висотою, а також кількість частинок, що осідають на земній поверхні, $1/м^3$.

При розв'язанні цього рівняння враховуються такі граничні умови: межа розповсюдження пилу від стаціонарного джерела визначається розмірами санітарно-захисної зони (СЗЗ) підприємства; джерело розташовується в центрі координатної системи; інтенсивність викидів джерела залишається постійною [74-76].

Розв'язання рівняння 3.3. з метою отримання числових результатів можливе шляхом використання скінченно-різницевої залежності. Для цього слід здійснити дискретизацію простору поширення забруднення твердими пиловими частинками, враховуючи відстань від джерела до меж санітарно-захисної зони (СЗЗ) підприємства із заданими інтервальними значеннями. Тобто, неперервний простір моделюється сіткою з певним кроком дискретизації Δx (у випадку одновимірного простору), $\Delta x, \Delta y$, (для двовимірного) чи $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ (для тривимірного). Значення фізичних величин, таких як концентрація, температура, швидкість тощо, визначаються лише в цих дискретних точках сітки [75,76].

Дискретизація простору є ключовим етапом чисельного розв'язання диференціальних рівнянь, зокрема рівняння дифузійного перенесення. Одним із найбільш поширених підходів для цього є метод скінченних різниць. Цей підхід

передбачає заміну диференціальних операторів різницеvими, що дає змогу перетворити диференціальне рівняння у систему алгебраїчних рівнянь. Розглянемо процес дискретизації простору для одновимірного рівняння дифузії.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.4.)$$

Припустимо, що ми дискретизуємо простір із кроком Δx і час із кроком Δt . Позначимо концентрацію в точці $x_i = i\Delta x$ та в момент часу $t_n = n\Delta t$ як C_i^n .

Тоді ми можемо скористатись просторовою та часовою дискретизацією.

Диференціальне рівняння 3.3. при умові - $x = x_i$, ($i = 1, 2, \dots, n-1$) можна замінити лінійним рівнянням:

$$\mu_i \frac{C_{i+2} - 2C_{i+1} + C_i}{h^2} + u_i \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2h} + \sigma_i C_i = Q\delta(x - x_0). \quad (3.5.)$$

Перетворюючи рівняння 3.5. відносно C_{i-1} , U_i та C_{i+1} , отримуємо вираз для визначення концентрації дрібнодисперсного пилу:

$$\left(\frac{\mu_i}{h^2} - \frac{u_i}{4h}\right) \cdot C_{i-1} + \left(\frac{-4\mu_i}{h^2} + \frac{\delta}{(1-h)}\right) \cdot C_i + \left(\frac{\mu_i}{h^2} + \frac{u_i}{4h}\right) \cdot C_{i+1} = Q \cdot \delta(x - x_0). \quad (3.6.)$$

Для прогнозування концентрації дрібнодисперсного пилу на заданій відстані від джерела розсіювання необхідно враховувати швидкість вітру та потужність джерела викиду. Ці фактори є ключовими в рівнянні дисперсії пилових включень в атмосфері, яке дозволяє описати поведінку частинок пилу під впливом метеорологічних умов.

Рівняння дисперсії дає змогу визначити розподіл концентрацій пилу залежно від висоти, горизонтальної відстані від джерела та швидкості вітру.

Швидкість вітру впливає на перенесення частинок пилу, визначаючи напрямок та дальність їх поширення. Потужність джерела, яка характеризує обсяг і інтенсивність викидів, визначає початкову кількість частинок, що надходять в атмосферу. У моделі враховуються ці параметри, що дозволяє описати процес розсіювання пилу в просторі.

Результати моделювання дають змогу аналізувати рівень забруднення повітря на різних відстанях від джерела викидів, виявляти зони з найвищими концентраціями забруднювачів та ефективно визначати межі санітарно-захисних зон (СЗЗ). Ці обчислення дозволяють передбачати зміни рівня забруднення повітря залежно від метеорологічних умов або варіацій у потужності джерела викидів. Такий підхід є дієвим інструментом для аналізу впливу промислових підприємств на навколишнє середовище та розробки заходів зі зниження атмосферного забруднення. [77].

У більшості досліджень, присвячених моделюванню розсіювання забруднювальних речовин в атмосфері, як вітчизняні, так і зарубіжні науковці застосовують рівняння Гаусса. Це рівняння широко використовується для опису процесу розсіювання полутантів, оскільки воно ґрунтується на припущенні, що концентрація забруднюючих речовин у просторі розподіляється відповідно до нормального (гауссового) закону. Це рівняння враховує ключові параметри: швидкість вітру, яка визначає напрямок і дальність перенесення; потужність джерела, що впливає на обсяг забруднень; висоту джерела, яка зменшує концентрацію на поверхні землі; та турбулентність атмосфери, яка сприяє змішуванню повітря. Модель дозволяє прогнозувати розподіл концентрацій забруднювачів на різних відстанях та висотах, оцінювати екологічні ризики та визначати санітарно-захисні зони [78].

Для обраного об'єкта дослідження розрахунок ступеня розповсюдження тонкодисперсних часток цементного виробництва виконували з урахуванням таких параметрів: потужність джерела викидів становить $8,4 \times 10^{-3}$ кг/с, середня швидкість вітру – 1,5 м/с, відстань від джерела – 1000 м, а коефіцієнт горизонтальної дифузії, для аерозолі прийнято рівним $1,5 \text{ м}^2/\text{с}$.

На рисунку 3.1 наведені результати моделювання, які демонструють поступову зміну концентрації пилу в міру віддалення від джерела викиду.

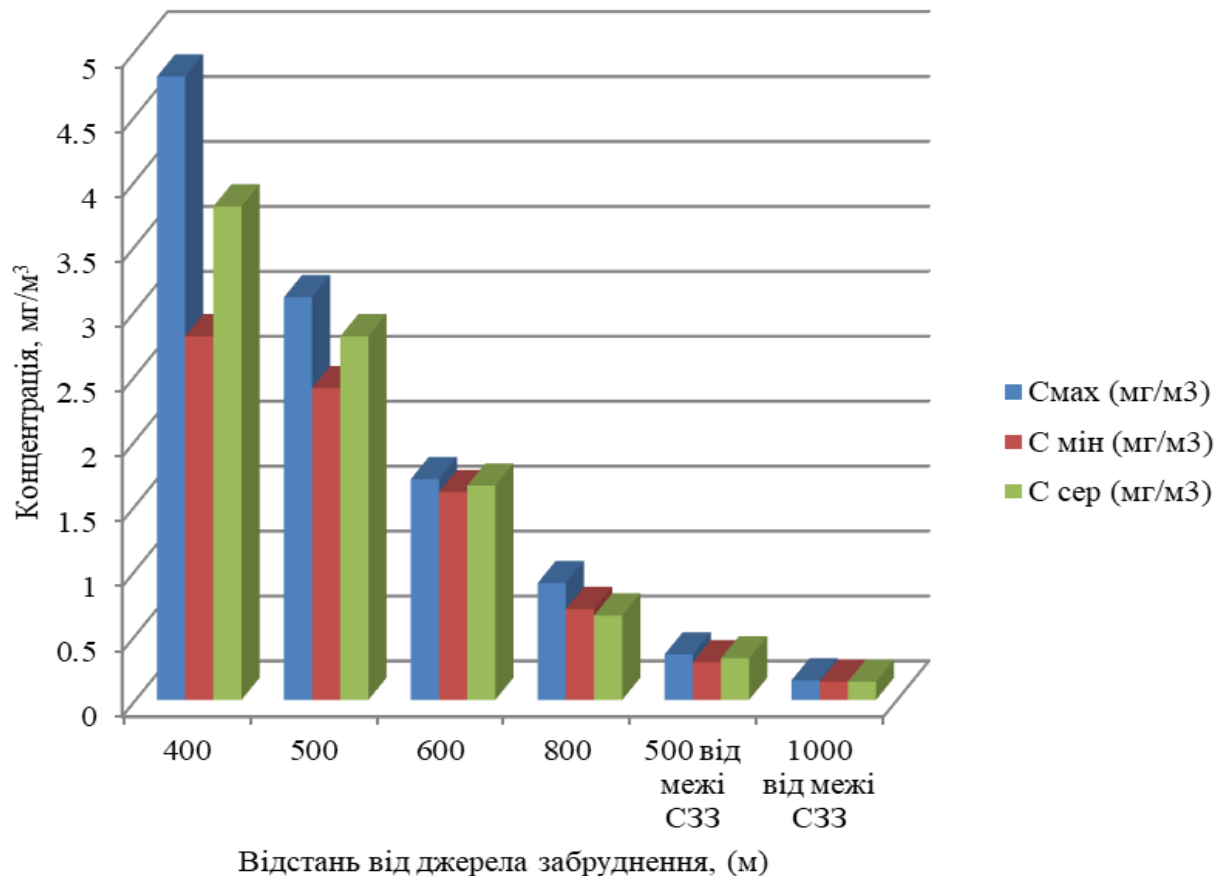


Рис. 3.1. – Розподіл рівнів концентрації дрібнодисперсного пилу в зоні навколо джерела викиду.

Розрахунки та побудована модель (рис. 3.1.) відображають характер поширення забруднень у атмосфері при круговому напрямку вітру. У моделі враховується, що найбільша кількість домішок осідає на певній відстані від джерела викиду. Це явище обумовлене перенесенням повітряних мас, які підхоплюють частинки дрібнодисперсного пилу, переносючи їх разом із потоком вітру. Така поведінка частинок пояснюється їхньою високою інерційністю, що дозволяє їм рухатися разом із вітровими потоками на значні відстані, перш ніж осісти на поверхню.

Для наочного представлення результатів моделювання було створено карти розсіювання забруднювачів, які демонструють залежність концентрації домішок

від відстані до джерела викиду. Ці карти (рис. 3.2. та 3.3.) дозволяють візуально оцінити, як забруднення розподіляється в просторі за різних умов. Вони ілюструють основні особливості розсіювання, включаючи зони з найбільшою концентрацією забруднювачів, а також поступове зниження концентрації у міру віддалення від джерела.

Складені карти розсіювання слугують важливим інструментом для оцінки та прогнозування впливу забруднень на довкілля. Вони допомагають оцінити екологічні ризики, визначити зони підвищеного забруднення та обґрунтувати заходи для мінімізації впливу шкідливих речовин. Результати моделювання наочно демонструють ефективність застосування математичних моделей у дослідженнях атмосферного розсіювання поллютантів.

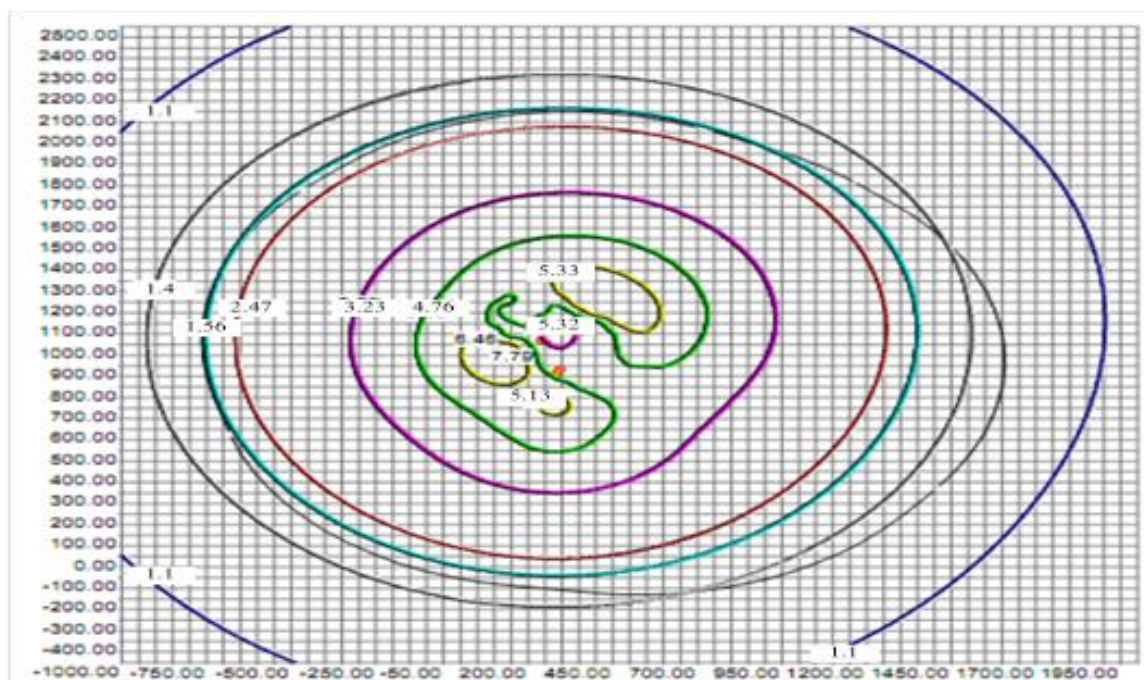


Рис. 3.2. – Карта розсіювання цементного пилі в атмосфері при існуючій схемі очищення

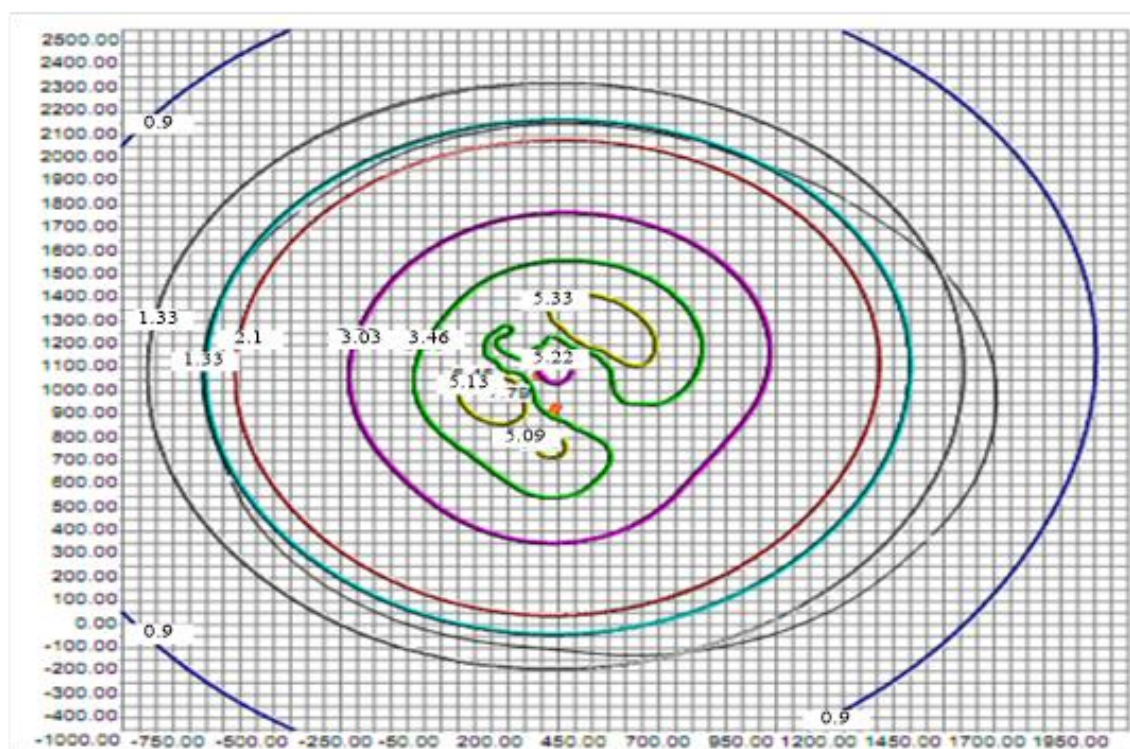


Рис.3.3. – Карта розсіювання цементного пилу в атмосфері при пропонованій схемі очищення повітря від цементного пилу

Експериментальні дані показали, що концентрація поллютантів при розсіюванні цементного пилу за існуючим технологічним процесом є на 10 - 15% вищою порівняно з використанням запропонованої нами технологічної схеми. Це підтверджує ефективність впроваджених технологічних рішень, спрямованих на зменшення рівня атмосферного забруднення.

Для перевірки точності та адекватності запропонованої математичної моделі розсіювання дрібнодисперсного пилу було проведено порівняння розрахункових даних моделі з результатами експериментів. Аналіз показав, що відхилення між розрахунковими значеннями та експериментальними результатами не перевищує 20% у межах усього дослідженого діапазону відстаней від джерела викиду (рис. 3.4.). Це свідчить про високу точність математичної моделі у прогнозуванні розподілу забруднюючих речовин.

Згідно з результатами досліджень, запропонована модель не лише дозволяє ефективно описати процес розсіювання цементного пилу в атмосфері, але й забезпечує достатню точність для використання у практичних цілях. Така відповідність між експериментальними даними та результатами моделювання

підтверджує можливість застосування моделі для оцінки впливу промислових викидів на довкілля, а також для розробки заходів з оптимізації технологічних процесів з метою зменшення рівня забруднення.

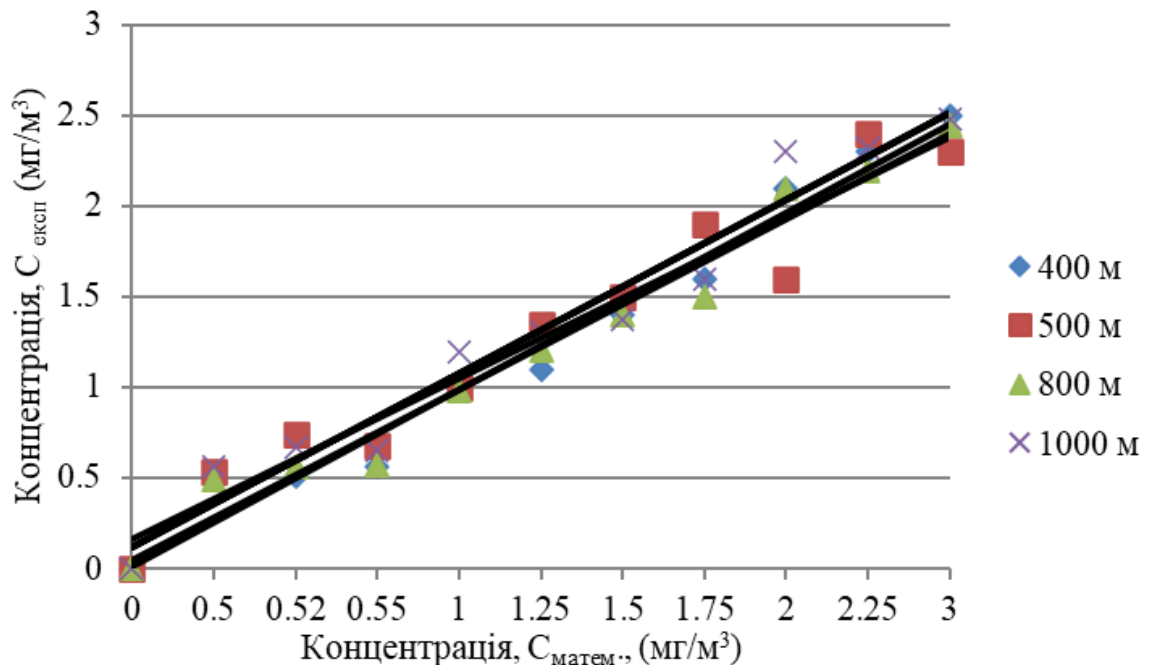


Рис.3.4. – Порівняння результатів розрахунку за залежністю (3.6.) та експериментальними даними концентрації цементного пилу в атмосфері

Коефіцієнт кореляції Пірсона - це числовий показник, що відображає ступінь і напрям лінійного зв'язку між двома змінними. Його значення варіюється в межах від -1 до 1. Якщо коефіцієнт дорівнює +1, це свідчить про повний позитивний лінійний зв'язок: зі зростанням однієї змінної інша також зростає. Значення -1 означає повний негативний зв'язок, коли підвищення однієї змінної супроводжується зменшенням іншої. Якщо ж значення близьке до нуля, то це вказує на відсутність лінійної залежності між змінними.

У контексті дослідження коефіцієнт кореляції Пірсона (R^2) оцінює, наскільки добре отримані експериментальні дані відповідають лінії тренду. Для аналізу розсіювання цементного пилу та порівняння з теоретичними передбаченнями модельного рівняння було обчислено R^2 . Отримані результати засвідчили, що значення коефіцієнта кореляції Пірсона коливається в діапазоні

від 0,85 до 0,95. Це вказує на тісний лінійний зв'язок між експериментальними даними та результатами прогнозів математичної моделі.

Ці результати демонструють надійність математичної моделі та її відповідність експериментальним даним, що дозволяє використовувати її для прогнозування та аналізу розподілу забруднювачів у повітрі.

Розрахунок запропонованої моделі з урахуванням граничних умов дає змогу порівняти тривимірний графічний розподіл цементного пилу в реальних умовах залежно від відстані до джерела забруднення за умови використання запропонованого пристрою для ефективного очищення повітря від цементного пилу [78]. Рішення критеріальних рівнянь та побудова графічних залежностей (рис. 3.5.) отримані з використанням програми Wolfram Alpha (формл 3.7 – 3.9.).

$$\text{Interpreting as: } \text{maximize } (Y \times 158,24 \times 17,2 \times X) \times \frac{(X^{0,754} \times Y^{0,15})}{(2,24 \times X^{0,94})}$$

$$\text{in } 12 \leq X \leq 20; 23 \leq Y \leq 58. \quad (3.7.)$$

Input interpretation:

	function		
maximize		$(Y \times 158,24 \times 17,2 \times X) \times \frac{(X^{0,754} \times Y^{0,15})}{(2,24 \times X^{0,94})}$	
	domain		
		$12 \leq X \leq 20; 23 \leq Y \leq 58$	(3.8.)

Global maximum:

$$\max \left\{ \frac{(Y \times 158,24 \times 17,2 \times X)(X^{0,754} \times Y^{0,15})}{2,24 \times X^{0,94}} \mid 12 \leq X \leq 20 \wedge 23 \leq Y \leq 58 \right\} =$$

$$\frac{6737932912839621 \times 2^{\frac{389}{500}} \times 5^{\frac{407}{500}} \times 29^{\frac{3}{20}}}{47804853377} \quad (3.9.)$$

at (X,Y) = (20, 58)

3D plot

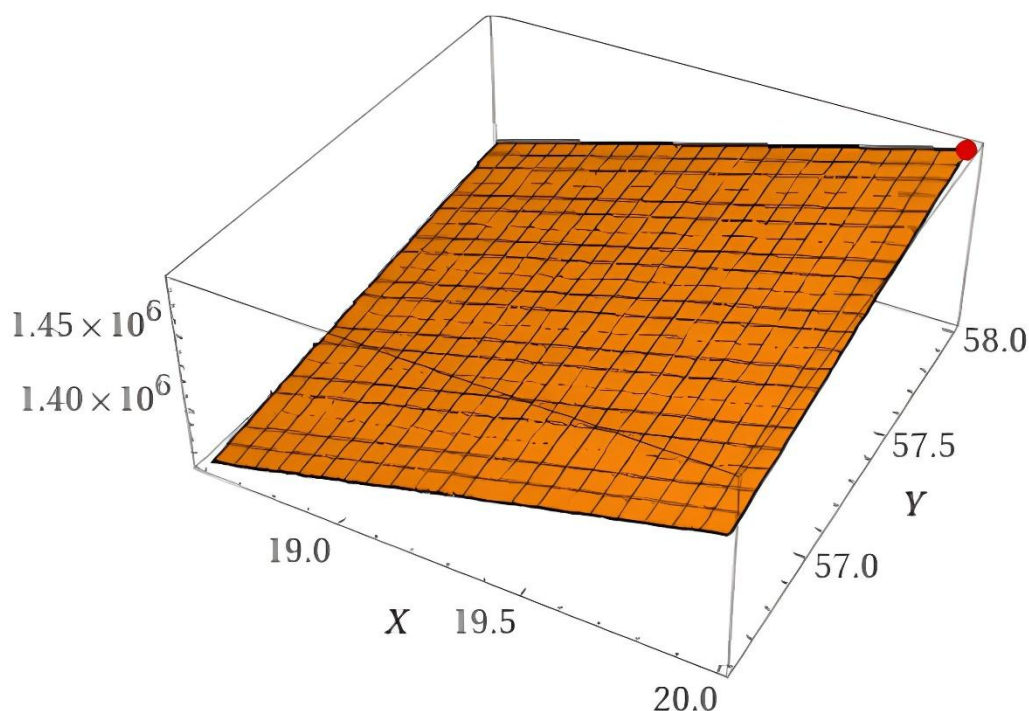


Рис. 3.5. – 3D графік поширення забрудненого повітря в реальних умовах при врахуванні граничних умов та впровадженні очисного обладнання за розробленим патентом на корисну модель

Отже, запропонована математична модель розсіювання твердих частинок демонструє високу точність у описі процесу поширення пилу в атмосферному повітрі. Результати моделювання співпадають з експериментальними даними, що підтверджує її ефективність для прогнозування концентрацій забруднювачів та аналізу їх розподілу [79].

3.2. Застосування регресійної моделі як статистичного інструменту для прогнозування розповсюдження цементного пилу в атмосферному повітрі

Антропогенний вплив цементного пилу має негативні наслідки не лише для якості атмосферного повітря, а й для ґрунтового покриву. Осідаючи на поверхню землі, дрібнодисперсні частинки цементу можуть змінювати її хімічний склад, зокрема підвищувати рівень лужності, що створює несприятливі умови для росту рослин. Крім того, у ґрунті можуть накопичуватися важкі метали, які поступово потрапляють у харчовий ланцюг, а також відбувається

деградація його структури, що негативно впливає на родючість та здатність утримувати вологу [80, 81].

Поширення цементного пилу у водні екосистеми також має серйозні наслідки. Його осідання у водоймах сприяє зниженню рівня розчиненого кисню, що ускладнює життєдіяльність водних організмів. Також збільшується ризик забруднення джерел питної води, що може призвести до погіршення її якості та загрожувати здоров'ю населення.

Для зменшення впливу цементного пилу на довкілля необхідно застосовувати комплексні екологічні заходи, серед яких:

- використання сучасних систем очищення повітря, таких як електрофільтри та рукавні фільтри;
- вдосконалення технологічних процесів з метою мінімізації пилових викидів;
- створення зелених зон навколо промислових об'єктів, що допомагають поглинати пилові частинки;
- застосування методів вологої обробки при транспортуванні та зберіганні сировини;
- впровадження екологічно безпечних альтернативних матеріалів у виробництві.

Завдяки впровадженню сучасних технологій та ефективних природоохоронних заходів можна значно скоротити рівень забруднення навколишнього середовища, зменшити негативний вплив цементного виробництва на екосистеми та покращити загальну екологічну ситуацію.

Однак важливо підкреслити, що методи прогнозування розповсюдження цементного пилу відіграють ключову роль у контролі за його поширенням в атмосфері, особливо при використанні зазначених вище заходів [82,83].

Одним із підходів до прогнозування є розробка регресійної моделі, яка дозволяє оцінити динаміку розсіювання цементного пилу у повітрі з урахуванням метеорологічних умов та відстані від джерела забруднення [84,85].

Основним завданням такої моделі є визначення взаємозв'язку між різними факторами, що впливають на концентрацію пилу в повітрі. До них належать швидкість і напрямок вітру, температура, рівень вологості, атмосферний тиск, а також віддаленість від місця викиду. Аналіз цих параметрів дозволяє оцінити ризики забруднення та розробити ефективні заходи з його мінімізації [86,87].

Основною метою наших досліджень є побудова моделі, яка дозволяє прогнозувати концентрацію цементного пилу (наприклад, в мкг/м^3) у певній точці простору. Нами вже опублікована дифузійна модель поширення цементного пилу в атмосфері [82,83], яка враховує багатовекторний процес. Проте базовою моделлю розповсюдження цементного пилу в житловій забудові має бути нелінійна (трансформована) регресійна модель, в якій ми обираємо найпростіші незалежні змінні, які можуть впливати на розповсюдження пилу:

- X_1 — відстань від джерела викидів (км);

- X_2 — швидкість вітру (м/с);

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \quad (3.10.)$$

де:

- β_0 — масштабний параметр (базова концентрація),

- β_1 — параметр, що характеризує експоненційну швидкість зменшення концентрації пилу зі збільшенням відстані,

- β_2 — експонент, який описує вплив швидкості вітру.

Щоб побудувати модель, зручно застосувати логарифмічне перетворення, яке лінійлізує залежність:

$$\ln(y) = \ln(\beta_0) - \beta_1 X_1 + \beta_2 \ln(X_2) \quad (3.11.)$$

- $Y^* = \ln(y)$,

- $\alpha_0 = \ln(\beta_0)$.

Тоді модель набуває вигляду:

$$Y^* = \alpha_0 - \beta_1 X_1 + \beta_2 \ln(X_2) + \varepsilon, \quad (3.12.)$$

де ε — випадкова похибка.

Ця модель є лінійною відносно параметрів α_0 , β_1 та β_2 .

Ми скористаємось простішою моделлю на основі рівняння (3.10.) яке має лінійний характер. Проведені нами експериментальні дослідження зміни концентрації цементного пилу в атмосфері в залежності від швидкості вітру і відстані від джерела викиду дають змогу отримати лінійне рівняння у вигляді:

$$y = 12 - 2X_1 + 3X_2, \quad (3.13.)$$

де:

- $\beta_0 = 12$ — базовий рівень концентрації пилу ($\text{мкг}/\text{м}^3$),
- $\beta_1 = -2$ — кожне збільшення відстані на 1 км зменшує концентрацію на 2 $\text{мкг}/\text{м}^3$,
- $\beta_2 = 3$ — кожне збільшення швидкості вітру на 1 м/с підвищує концентрацію на 3 $\text{мкг}/\text{м}^3$.

Дані для п'яти узагальнених спостережень приведені в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1.

Узагальнення спостережень концентрації цементного пилу в атмосфері відносно відстані від джерела та швидкості вітру

Спостереження	X_1 (відстань, км)	X_2 (швидкість вітру, м/с)	y (концентрація, $\text{мкг}/\text{м}^3$)
1	1	4	22
2	2	3	17
3	3	2	12
4	4	3	10
5	5	2	8

Для розрахунку коефіцієнтів основного рівняння ми складаємо матрицю X , яка включає стовпець одиниць (для β_0) та стовпці для змінних X_1 і X_2 :

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 4 \\ 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 2 \\ 4 & 4 & 3 \\ 5 & 5 & 2 \end{pmatrix} \quad (3.14.)$$

Тоді вектор незалежної змінної відповідно:

$$Y = \begin{pmatrix} 22 \\ 17 \\ 12 \\ 10 \\ 8 \end{pmatrix} \quad (3.15.)$$

Цей приклад показує, як метод найменших квадратів може бути використаний для побудови регресійної моделі, що описує поширення цементного пилу в атмосфері [88]. У разі роботи з реальними даними до моделі можна додати додаткові змінні, такі як напрямок і швидкість вітру, рівень вологості, температура повітря та атмосферна стабільність. Це дозволить покращити точність прогнозування та більш детально відобразити процес дифузії забруднюючих частинок у повітрі.

Висновки до розділу 3.

1. За результатами досліджень встановлено, що дрібнодисперсні частинки цементного пилу (PM10, PM2.5) є вагомим джерелом забруднення повітря, яке шкодить здоров'ю людей, погіршує стан екосистем, впливає на зміну клімату та негативно позначається на якості водних і ґрунтових ресурсів. Визначено, що основними параметрами, які впливають на розповсюдження цементного пилу, є швидкість і напрямок вітру, висота джерела викидів, метеорологічні умови та топографічні особливості території.

2. Запропоновано та реалізовано математичну модель поширення цементного пилу в атмосфері на основі диференціального рівняння дифузійного перенесення. Розроблена модель враховує горизонтальну та вертикальну дифузію пилових частинок, метеорологічні умови та потужність джерела забруднення. Використання методу скінченних різниць дозволило провести дискретизацію простору та оцінити концентрацію пилу в різних точках досліджуваної території.

3. Розрахунки продемонстрували закономірності просторового розсіювання цементного пилу та його накопичення в певних зонах, що дозволяє

визначати критичні ділянки з найбільшими рівнями забруднення. Запропоновані карти розсіювання показали, що зменшення концентрації пилу відбувається із збільшенням відстані від джерела викиду, при цьому максимальна концентрація фіксується в межах 500 - 800 м від місця розташування виробничих потужностей.

4. Впровадження запропонованої схеми очищення повітря дозволило знизити рівень забруднення цементним пилом на 10 - 15% порівняно з існуючою схемою. Аналіз експериментальних даних підтвердив, що використання сучасних газоочисних технологій є ефективним методом зменшення концентрацій пилових частинок у повітрі та дозволяє мінімізувати екологічний вплив цементного виробництва.

5. Розроблено нелінійну регресійну модель, яка дозволяє прогнозувати концентрацію пилових частинок у повітрі залежно від метеорологічних факторів та відстані від джерела забруднення. Отримані коефіцієнти моделі свідчать, що збільшення відстані на 1 км зменшує концентрацію пилу на 2 мкг/м^3 , а кожне збільшення швидкості вітру на 1 м/с підвищує концентрацію на 3 мкг/м^3 .

6. Порівняння розрахункових даних із експериментальними результатами засвідчило високу точність моделі: відхилення між теоретичними та фактичними значеннями не перевищує 20%. Коефіцієнт кореляції Пірсона ($R^2 = 0,85 - 0,95$) підтвердив значний рівень відповідності прогнозних і реальних даних.

7. Впроваджені математичні моделі можуть бути використані для оперативного прогнозування рівня забруднення повітря цементним пилом у різних метеорологічних умовах. Це дає змогу не лише аналізувати вплив підприємств на довкілля, але й ефективно планувати екологічні заходи, спрямовані на зниження концентрацій шкідливих викидів та покращення якості атмосферного повітря в зонах впливу цементних заводів.

IV. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО МОНІТОРИНГУ ЕКОСИСТЕМ У ЗОНІ ВПЛИВУ ПРАТ “ІВАНО-ФРАНКІВСЬКЦЕМЕНТ”

4.1. Принципи моніторингу екосистем. Нормативна база та основні принципи моніторингу екосистем в Україні

Моніторинг екосистем є важливим інструментом для оцінки стану природних систем. Його основне завдання полягає у виявленні змін, викликаних як антропогенними, так і природними факторами. Принципи моніторингу базуються на систематичному спостереженні, зборі та аналізі даних, що є основою для ефективного управління природними ресурсами. Як зазначається у роботах [89,91], ключовим є дотримання системного підходу, що дозволяє враховувати всі аспекти функціонування екосистем.

Системний підхід до моніторингу передбачає розгляд екосистеми як єдиного цілого, де всі її компоненти взаємопов'язані. Це дозволяє визначити ключові показники, які найкраще відображають стан екосистеми та її реакцію на зовнішні впливи. Згідно з дослідженнями [90,92], така методологія дозволяє виявляти причинно-наслідкові зв'язки між окремими елементами екосистеми, сприяючи кращому розумінню екологічних процесів.

Адаптивний моніторинг підкреслює необхідність гнучкого підходу до методів та інструментів збору даних. Ця концепція враховує, що екосистеми та їхні умови постійно змінюються, тому програми моніторингу повинні регулярно переглядатися та оновлюватися. У дослідженні [93] йдеться про те, що адаптивність дозволяє моніторингу залишатися актуальним навіть у складних та мінливих умовах.

Залучення місцевих громад, науковців та інших зацікавлених сторін до процесу моніторингу є важливим аспектом, який підвищує довіру до отриманих результатів. Як зазначено у роботах [94], спільна робота громадськості та науковців сприяє ефективнішому обміну ресурсами та знаннями. Це забезпечує легітимність результатів моніторингу, особливо коли йдеться про управління природними ресурсами.

Сучасні інструменти, зокрема дистанційне зондування, геоінформаційні системи (ГІС) та автоматизовані сенсори, суттєво покращили можливості контролю та спостереження за станом природних екосистем. Завдяки цим інструментам стало можливим детальне спостереження за змінами в довкіллі, аналіз динаміки біорізноманіття та контроль екологічних процесів. Як зазначається в дослідженні [95], дистанційне зондування відіграє ключову роль у дослідженні екосистем, оскільки дозволяє оцінювати стан природних територій без необхідності безпосереднього втручання. Використання таких технологій забезпечує оперативне отримання високоточних даних у режимі реального часу, що сприяє прийняттю своєчасних і обґрунтованих управлінських рішень у сфері охорони довкілля та сталого використання природних ресурсів.

Інтеграція різноманітних даних з різних джерел є ключовим принципом сучасного моніторингу. Це включає біологічні, фізичні, хімічні та соціально-економічні показники, які дозволяють проводити комплексний аналіз екосистем. Як зазначено у роботі [96], використання сучасних баз даних та інформаційних систем є критично важливим для ефективного управління екосистемами.

Довгостроковий моніторинг є важливим для виявлення тенденцій та змін, які не можуть бути виявлені у короткостроковому періоді. У роботі [97] наголошується, що довгострокові дані є необхідними для оцінки впливу змін клімату на екосистеми.

Державна система моніторингу довкілля (ДСМД) є одним із ключових інструментів забезпечення екологічної безпеки в Україні. Вона спрямована на збирання, обробку, аналіз та використання даних про стан навколишнього середовища. Основна мета ДСМД - підтримка сталого розвитку країни, запобігання екологічним загрозам та забезпечення належного рівня життя населення через охорону природних ресурсів.

Державна система моніторингу довкілля (ДСМД) ґрунтується на законодавчих положеннях України, визначених у Законі "Про охорону навколишнього природного середовища", зокрема у статтях 20 та 22. Вони встановлюють правові засади для створення комплексної системи екологічного

моніторингу, яка включає організацію спостережень за станом довкілля, оцінку рівня його забруднення та надання актуальної інформації для ухвалення управлінських рішень. Як підкреслюється в офіційному документі Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України (Міндовкілля) [98], ця система відіграє ключову роль у формуванні ефективної державної екологічної політики. Вона забезпечує своєчасне реагування на зміни у навколишньому середовищі та сприяє реалізації заходів, спрямованих на його збереження та сталий розвиток.

Крім того, діяльність ДСМД регулюється постановою Кабінету Міністрів України від 30 березня 1998 року № 391 "Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля". Цей документ встановлює принципи, завдання та функції системи, а також регламентує взаємодію між її суб'єктами. За даними UNEP (2020) [99], нормативно-правова основа є важливим елементом забезпечення прозорості та ефективності моніторингу.

Функції моніторингу довкілля в Україні виконують кілька органів виконавчої влади, кожен із яких відповідає за окремі аспекти. Основними суб'єктами є:

- Міндовкілля, яке відповідає за загальний контроль за станом природного середовища, включаючи моніторинг атмосферного повітря, водних об'єктів і ґрунтів;
- Міністерство охорони здоров'я (МОЗ) проводить аналіз впливу екологічних факторів на здоров'я населення;
- Державне агентство водних ресурсів (Держводгосп) зосереджено на моніторингу якості водних ресурсів;
- Держкомлісгосп здійснює контроль за станом лісових масивів;
- Міністерство надзвичайних ситуацій (МНС) моніторить наслідки аварій, катастроф і радіаційний фон.

Як зазначено у звіті European Environment Agency (EEA, 2019) [100], багатогалузевий підхід дозволяє ефективно охопити всі ключові компоненти екосистем, забезпечуючи комплексність моніторингу.

Державна система моніторингу довкілля працює на основі кількох фундаментальних принципів:

Комплексність - охоплення всіх основних компонентів довкілля (атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, рослинність).

Багаторівневий підхід - система функціонує на трьох рівнях:

Загальнодержавний рівень забезпечує стратегічне планування.

Регіональний рівень зосереджений на пріоритетних завданнях конкретних регіонів.

Локальний рівень спрямований на вирішення завдань для окремих територій з високим рівнем антропогенного навантаження.

Державна система моніторингу довкілля працює на основі кількох фундаментальних принципів:

Комплексність - охоплення всіх основних компонентів довкілля (атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, рослинність).

Багаторівневий підхід - система функціонує на трьох рівнях:

1. Загальнодержавний рівень забезпечує стратегічне планування.
2. Регіональний рівень зосереджений на пріоритетних завданнях конкретних регіонів.
3. Локальний рівень спрямований на вирішення завдань для окремих територій з високим рівнем антропогенного навантаження.

Згідно з рекомендаціями [101], такий багаторівневий підхід дозволяє адаптувати моніторингові заходи до локальних потреб.

Взаємодія суб'єктів - забезпечує координацію між різними органами влади. Єдина інформаційна система дозволяє об'єднувати дані, отримані від різних суб'єктів, для проведення комплексного аналізу.

Попри досягнення в організації ДСМД, система має низку викликів. Серед них - недостатнє фінансування, відсутність сучасного обладнання, а також потреба у вдосконаленні нормативно-правової бази. Як зазначено у роботі [102], впровадження сучасних технологій, таких як дистанційне зондування та геоінформаційні системи, може значно підвищити ефективність моніторингу.

Перспективи вдосконалення ДСМД включають:

1. Розробку та впровадження сучасного програмного забезпечення для обробки та аналізу даних.
2. Підвищення рівня міжнародної співпраці у сфері моніторингу.
3. Розширення участі громадськості у моніторингових програмах.

4.2. Рекомендації щодо модернізації очисного обладнання на ПрАТ “Івано-Франківськцемент”

Проблема ефективного уловлювання промислового пилу залишається актуальною для багатьох виробничих секторів, особливо в будівельній галузі, де процеси переробки та транспортування матеріалів супроводжуються значним викидом пилових частинок. Особливу увагу привертає тонкодисперсний пил, який має суттєвий вплив як на стан довкілля, так і на характеристики кінцевої продукції. У процесі виробництва цементу дрібнодисперсні частинки мають ключове значення для формування високоякісного бетону, оскільки вони забезпечують його підвищену міцність і здатність протистояти впливу несприятливих зовнішніх факторів. Однак, незважаючи на технологічний розвиток, сучасні системи очищення повітря не завжди здатні повністю усувати найдрібніші частинки через обмеження у фільтраційних можливостях. Це вимагає вдосконалення методів пиловловлювання, застосування інноваційних рішень і розробки нових підходів до зменшення пилових викидів у промисловому секторі.

Сучасні технології вловлювання пилу стикаються з низкою труднощів, таких як громіздкість систем, низька ефективність очищення та складність у відокремленні пилу різного дисперсного складу. Особливо це стосується цементного пилу, тонкодисперсні фракції якого мають високий вплив на якість бетону. Ефективне розділення таких фракцій та їхнє подальше використання дозволяє не лише підвищити економічну ефективність виробництва, але й значно знизити негативний вплив на екологію.

У цьому контексті запропонована модель пиловловлюючої системи спрямована на вирішення проблеми повного вловлювання тонкодисперсної

фракції промислового пилю, її відокремлення та ефективного використання з мінімальними витратами. Нижче представлено опис конструкції та функціональних можливостей запропонованої системи, що враховує сучасні виклики галузі.

Корисна модель відноситься до пристроїв для вловлювання промислового пилю, які можуть застосовуватися в різних галузях виробництва, зокрема в промисловості будівельних матеріалів, де відбувається значне виділення пилю. Сучасні пиловловлюючі системи мають суттєві недоліки, такі як громіздкість конструкцій і низька ефективність вловлювання. Особливо складною є задача вловлювання пилю з широким дисперсним складом, що характерно для цементної промисловості. Водночас тонкодисперсний пил, утворений під час виробництва цементу, має значний вплив на якість бетону, визначаючи його марку. Використання таких фракцій не лише сприятиме екологічному покращенню, але й дозволить підвищити економічну ефективність виробничих процесів.

Відома пиловловлююча система включає циклон дифузорового типу з подвійною стінкою, де зовнішня стінка є суцільною, а внутрішня — перфорованою. Система оснащена входним та вихідним патрубками для запиленого та очищеного повітря, які підключені до вузької та ширшої частини кільцевого зазору дифузора. У кільцевому зазорі знаходиться спіральна направляюча для руху запиленого повітря, прикріплена до внутрішньої стінки дифузора. Також система включає акустичний випромінювач, патрубок для виходу вловленого пилю та відділювач дисперсного пилю жалюзійного типу. Детальний опис цієї пиловловлюючої системи наводиться на сторінках 93-95, а її схема представлена на рисунку 21 (ст. 94) у монографії Батлука В.А. "Акустичні пиловловлювачі" (Львів, "Афіша", 2000 р.).

Однак, зазначена пиловловлююча система має низькі експлуатаційні характеристики, зокрема недостатню ефективність вловлювання. Це обумовлено тим, що тонкодисперсні фракції деяких промислових пилин не відокремлюються від основної маси пилоповітряної суміші. Основні сили, що діють у відомій системі - гравітаційна, відцентрова та акустична коагуляція перед

жалюзійним відділювачем, не забезпечують необхідного рівня очищення повітря. Варто підкреслити, що тонкодисперсні фракції деяких видів промислового пилю, зокрема цементного, мають суттєвий вплив на якість бетону. Дрібні частинки цементу сприяють покращенню марки бетону, підвищуючи його міцність та стійкість до впливу агресивних середовищ, зокрема атмосферних опадів.

До того ж, тонкодисперсні пилинки, які вловлюються разом з іншими фракціями, важко, а іноді й неможливо, відокремити від загальної маси вловленого пилю. Цей процес розділення вимагає значних витрат, що не лише погіршує економічні результати виробництва, але й ускладнює технологічне обладнання.

Завданням запропонованої нами корисної моделі є створення такої пиловловлюючої системи, яка би забезпечувала повне вловлювання тонкодисперсної фракції промислового пилю, а також просте та ефективне розділення грубодисперсної і тонкодисперсної фракцій цементного пилю з мінімальним використанням додаткового технологічного обладнання.

Поставлене завдання реалізується за допомогою пиловловлюючої установки, яка включає в себе циклон дифузорового типу з подвійною стінкою: зовнішня стінка є герметичною, а внутрішня - має перфорацію. До вузької та широкої частин кільцевого зазору дифузора приєднані відповідно вхідний і вихідний патрубки для подачі запиленого й відведення очищеного повітря. У кільцевому зазорі розміщено спіральну напрямну, яка кріпиться до внутрішньої стінки та направляє потік запиленого повітря. Конструкція також включає акустичний випромінювач, патрубків для виведення зібраного пилю та відділювач дрібнодисперсних частинок.

Відповідно до корисної моделі, система додатково обладнана блоком рукавних фільтрів, камерою чистого повітря з більшим діаметром, камерою повітряної турбіни меншого діаметра з соплом та повітропроводом, а також збірною воронкою для тонкодисперсного пилю. Блок рукавних фільтрів має концентрично встановлені на валу рукави різного діаметра, закріплені між

нижнім диском меншого діаметра та верхнім - більшого. Рукави розташовані так, що ті, які мають менший діаметр, ближчі до вала, а з більшим - далі, займаючи щонайменше 75% довжини вала. Виходи фільтрів виступають за межі верхнього диска, на нижній частині якого рівномірно розміщені 3 або 4 опорні кулачки. Вони входять у кільцеву впадину верхнього фланця, що закриває широку частину кільцевого зазору циклона.

Над фільтрами розміщена суцільна перегородка із сальниковим ущільненням у центрі для проходу вала, яка формує камеру чистого повітря. До неї жорстко приєднана камера меншого діаметра, в якій розміщена повітряна турбіна з соплом, направленим на верхню частину її колеса. Це сопло з'єднується повітропроводом з камерою чистого повітря, а з іншого боку камера турбіни має патрубок виходу очищеного повітря.

Кільцева впадина верхнього фланця має профіль, поділений на 3 або 4 зони з поступовим підйомом (кут $5 - 15^\circ$) та різким спуском у зворотному напрямку (кут $85 - 90^\circ$), що забезпечує перетворення обертального руху вала на зворотно-поступальний рух блоку фільтрів. Це дозволяє ефективно струшувати накопичений дрібнодисперсний пил у збірну воронку, розташовану під фільтрами. Акустичний випромінювач виконаний у вигляді кільця і закріплений під фланцем, що накриває широку частину дифузора між внутрішньою стінкою та блоком фільтрів.

Доповнення відомої пиловловлюючої системи блоком рукавних фільтрів дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт ефективності вловлювання за рахунок вловлення тонкодисперсного пилу, який в принципі не вловлюється пристроями сухого очищення, до яких відносяться циклони. У камері чистого повітря збільшеного діаметра, яка з'єднує виходи всіх рукавів, відбувається накопичення очищеного повітря з метою подальшого використання його енергетичного потенціалу. Доповнення запропонованої конструкції пиловловлюючої системи камерою повітряної турбіни, дещо меншого діаметра ніж камера очищеного повітря, забезпечує обертання вала блока рукавних фільтрів. Конструкція блоку рукавних фільтрів, виконаного у вигляді концентрично розташованих і жорстко

закріплених на валу між нижнім диском меншого діаметра та верхнім диском більшого діаметра, а також спеціальне розміщення фільтрів - із рукавами меншого діаметра ближче до вала та більшими далі від нього при однаковій кількості по всіх траєкторіях - забезпечує рівномірний час контакту запиленого повітря з фільтрувальною поверхнею. Це, у свою чергу, дозволяє уникнути нерівномірного осідання частинок пилу на фільтрувальному матеріалі та підвищує ефективність очищення. Вибір співвідношення довжини рукавних фільтрів величиною у 0.75 довжини вала забезпечує рівномірний розподіл напружень на згаданому валу. А це гарантує дотримання певного ресурсу блока рукавних фільтрів. Розташування на верхній стороні вала, на якому закріплений блок рукавних фільтрів, повітряної турбіни, до верхньої частини лопаток якої впритул підходить сопло, до якого подається очищене повітря. На протилежному боці камери повітряної турбіни розташований вихідний патрубок для очищеного повітря. Завдяки дії реактивних сил та використанню аеродинамічних характеристик потоку очищеного повітря, блок рукавних фільтрів приводиться в обертання всередині простору, який утворений подвійною стінкою корпусу циклона дифузорового типу.

На верхній поверхні фланця, що герметично закриває кільцевий зазор між подвійними стінками корпусу циклона, виконана спеціальна кільцева впадина з профілем, поділеним на три або чотири функціональні зони. Ці зони мають плавний підйом під кутом не менше 5 - 15 градусів і різкий спад у протилежному напрямку під кутом 85 - 90 градусів. Така конструкція дозволяє перетворювати обертальний рух вала блоку рукавних фільтрів у зворотно-поступальний, що забезпечує ефективне струшування пилу з фільтрувальної поверхні. В такий спосіб забезпечується періодичне струшування тонкодисперсного пилу з фільтрувальної поверхні рукавних фільтрів у збірну воронку тонкодисперсного пилу. А розташування збірної воронки тонкодисперсного пилу в об'ємі корпусу циклону під блоком рукавних фільтрів, де цей пил накопичується для подальшого використання.

Акустичний випромінювач, виготовлений у формі кільця та закріплений на нижній стороні фланця, який перекриває широку частину дифузора корпусу циклону між внутрішньою стінкою та блоком рукавних фільтрів, сприяє короткотривалій коагуляції дрібнодисперсного пилю. Це дозволяє значно підвищити ефективність його вловлювання в системі очищення повітря.

Запропонована система пиловловлювання підвищує ефективність очищення від пилю, забезпечуючи роздільне уловлювання дрібнодисперсних частинок. У розробленій конструкції пиловловлюючої системи функціонують такі етапи очищення:

- під впливом відцентрових сил у кільцевому проміжку між подвійними стінками корпусу циклона дифузорового типу;
- під впливом інерційних сил у тому ж просторі, оскільки потік пилоповітряної суміші спрямовується у звужену частину дифузора;
- під дією гравітаційних сил, що впливають на частинки пилю;
- завдяки відцентровим силам у проміжку між внутрішньою стінкою корпусу циклона та блоком рукавних фільтрів;
- під впливом інерційних сил у просторі між перфорованою стінкою та блоком рукавних фільтрів;
- завдяки акустичному полю, яке сприяє короточасній коагуляції дрібнодисперсного пилю;
- під дією динамічних сил опору, які пропускають через шар пористого матеріалу лише дрібніші частинки пилю.

За рахунок вказаних етапів очищення у запропонованій пиловловлюючій системі суттєво зростає ефективність її роботи. Це пов'язано з тим, що суміщення в одному пристрої діючих сил різної природи на частки пилинок, сприяє підвищенню ефективності пиловловлювання.

Інтеграція в одному пристрої циклона, акустичного коагулятора та блоку рукавних фільтрів із механізмом періодичного струшування, доповнених збірною воронкою для тонкодисперсного пилю, забезпечує можливість розділення уловленого пилю на дві фракції. Тонкодисперсна фракція, яка має

високу цінність, може бути використана для виробництва високоякісного цементу, тоді як грубодисперсну частину повертають у технологічний процес на завершальній стадії виробництва.

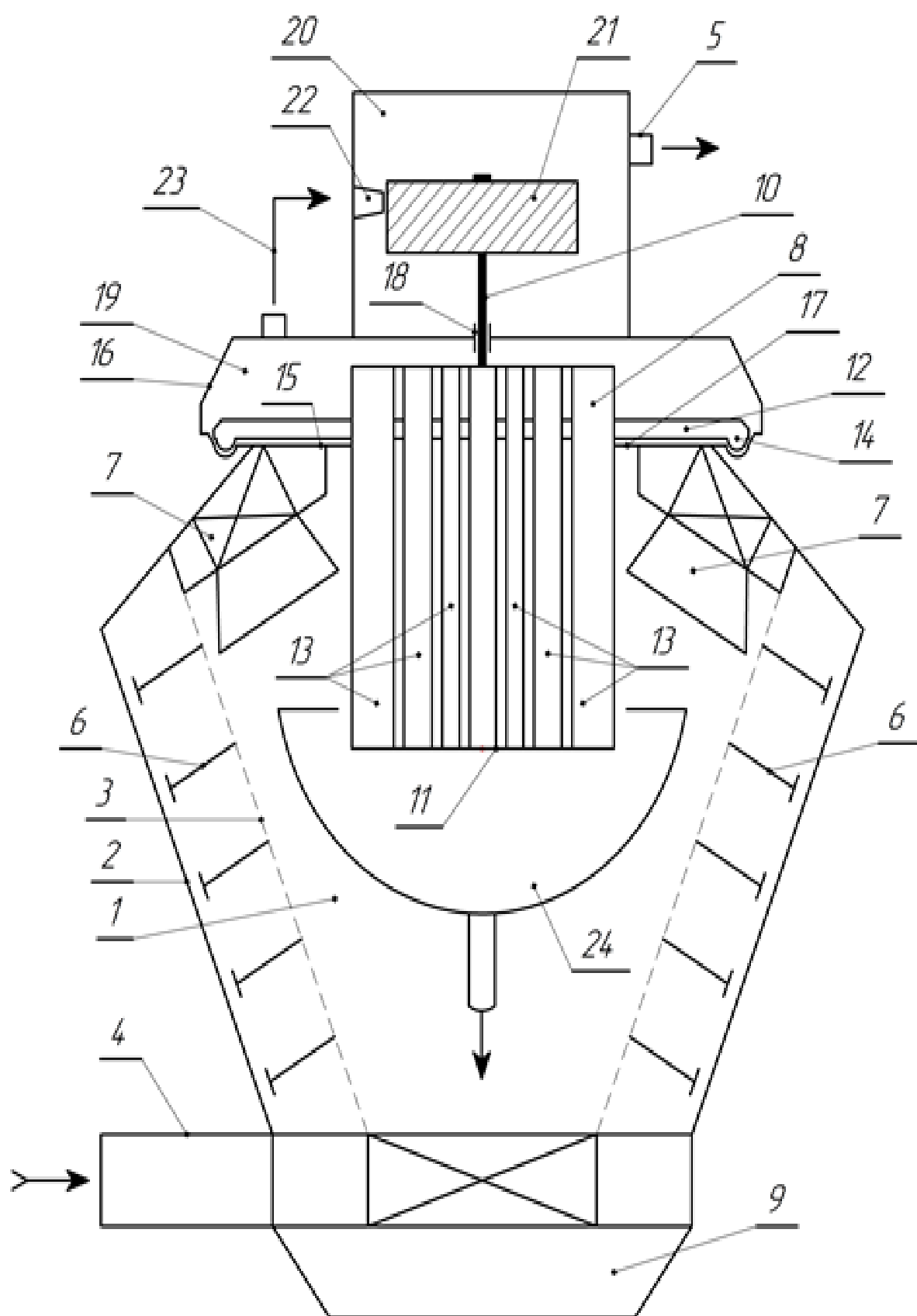
На рисунку 4.1. зображена принципова схема пиловловлюючої системи.

Розроблена пиловловлююча система містить циклон 1 дифузорового типу із подвійною стінкою, зовнішня стінка 2 якого є суцільною, а внутрішня 3 є перфорованою, вхідний 4 патрубок запиленого та вихідний 5 патрубок очищеного повітря, які відповідно під'єднані до вузької та ширшої частини кільцевого зазору дифузора. В кільцевому зазорі дифузора між суцільною стінкою 2 і перфорованою стінкою 3 розташована спіральна направляюча 6 руху запиленого повітря, прикріпленої до внутрішньої стінки 3, при цьому запилене повітря рухається знизу вгору.

Акустичний випромінювач 7 розміщено у верхній частині дифузора, безпосередньо в кільцевому зазорі між внутрішньою перфорованою стінкою 3 та відділювачем тонкодисперсного пилу 8. У нижній частині корпусу циклона встановлено патрубок 9 для виведення зібраного пилу. У запропонованій конструкції пиловловлюючої системи функцію відділювача тонкодисперсного пилу виконує блок рукавних фільтрів, що забезпечує високий ступінь очищення повітря від дрібних частинок.

На рис. 4.2. зображена схема блока рукавних фільтрів.

Блок рукавних фільтрів сформований із рукавів 13, виготовлених зі спеціального фільтрувального матеріалу, які розміщені концентрично та жорстко закріплені на валу 10 між двома дисками: нижнім 11 — меншого діаметра та верхнім 12 — більшого діаметра, що встановлені перпендикулярно до осі вала. Рукави займають щонайменше 75% довжини вала, при цьому ті, що мають менший діаметр, розташовані ближче до центрального вала, а більші — на зовнішніх траєкторіях. Кількість рукавів визначається з урахуванням аеродинамічних параметрів, таких як діаметр та швидкість обертання вала, для досягнення рівномірного осідання пилу на фільтрувальній поверхні.



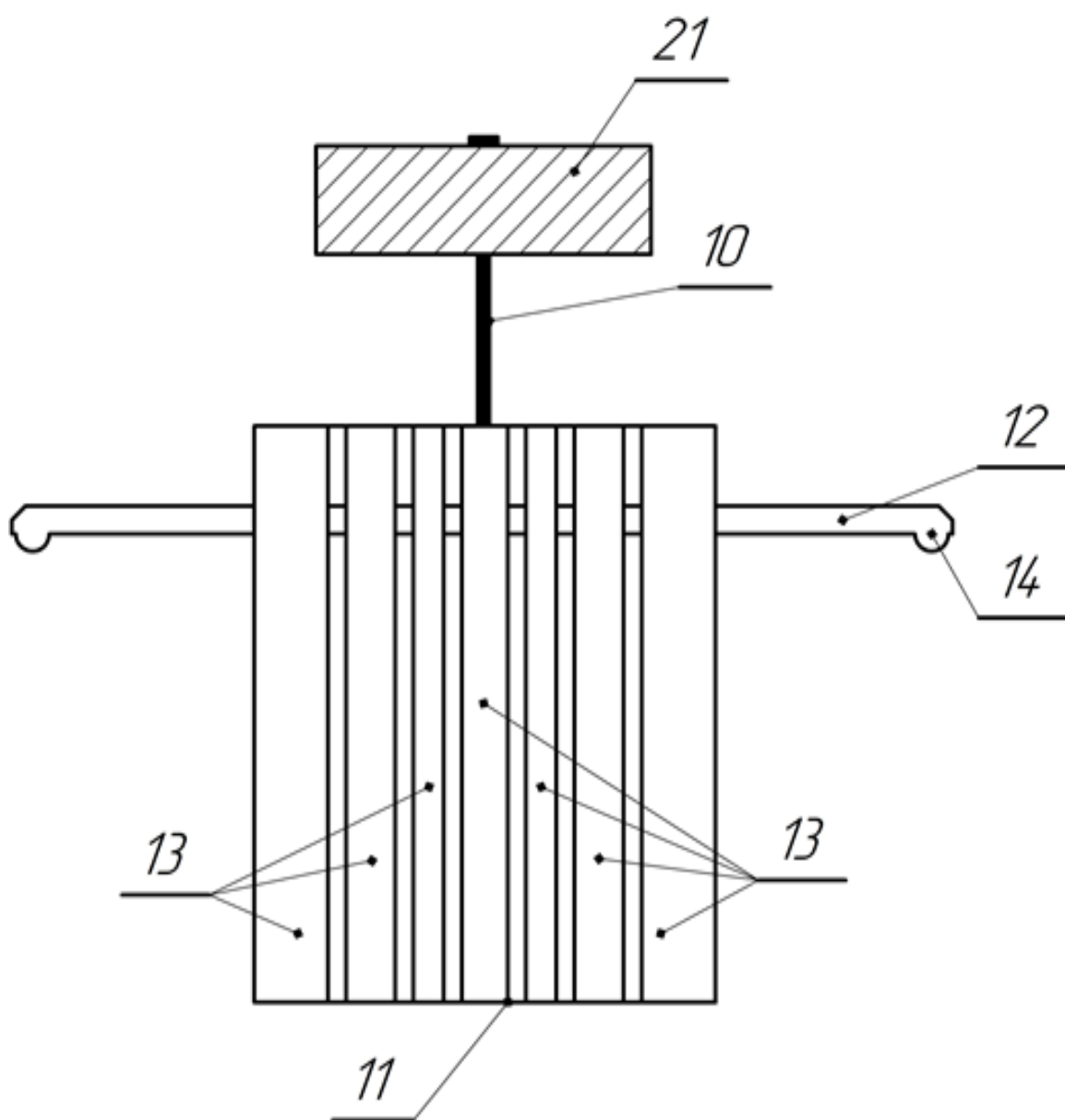


Рис. 4.2. – Блок рукавних фільтрів (схема)

На рисунку 4.3. наведена схема розміщення рукавних фільтрів по концентричних колах (мінімальна кількість - три), а кожному колі їх кількість може бути три або чотири.

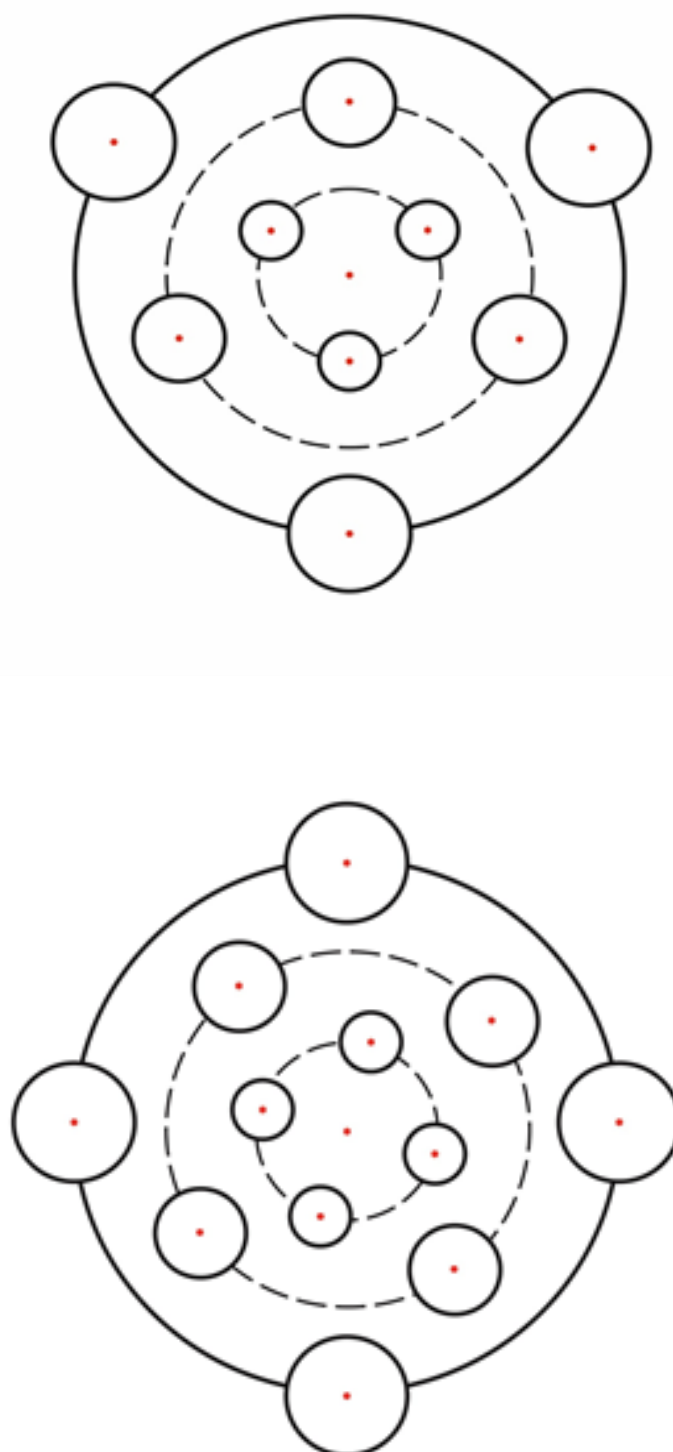


Рис. 4.3. - Схема розміщення рукавних фільтрів по концентричних колах

Вихідні частини всіх рукавів виступають за межі верхнього диска 12, на нижній стороні якого по колу рівномірно розміщені три або чотири опорні кулачки 14. Ці кулачки входять у спеціальну кільцеву впадину верхнього фланця

15, що герметично перекриває ширшу частину кільцевого зазору в корпусі циклона 1. Така конструкція забезпечує надійну фіксацію та передачу механічного впливу для реалізації зворотно-поступального руху блоку фільтрів.

Частина об'єму над виходами рукавних фільтрів, яка обмежена зверху суцільною перегородкою 16, знизу – щільним зазором 17 між фланцем 15 і рухомим диском 12, причому в центрі перегородки 18 міститься сальникове ущільнення 18 для вала 10 блока фільтрів, утворює камеру 19 чистого повітря. До верхньої частини перегородки 16 жорстко приєднана камера 20 меншого діаметра, в якій розміщена повітряна турбіна 21. Усередині камери встановлене сопло 22, орієнтоване на верхню частину робочого колеса турбіни, що дозволяє створити обертовий рух. Сопло з'єднується повітропроводом 23 із камерою чистого повітря 19, забезпечуючи подачу повітряної енергії для роботи турбіни. З протилежного боку камери повітряної турбіни розташований вихідний патрубок 5, через який виводиться очищене повітря з системи.

Кільцева впадина у верхній частині фланця 15, який герметично перекриває кільцевий зазор корпусу циклона, має спеціально сформований профіль, поділений на три або чотири функціональні зони. Кожна з них характеризується поступовим підйомом під кутом 5–10 градусів, за яким слідує різкий спад у зворотному напрямку під кутом 85–90 градусів. Така геометрія впадини забезпечує механічне перетворення обертального руху вала в зворотно-поступальний рух блоку рукавних фільтрів. Таким чином, в пиловловлюючій системі забезпечується перетворення обертового руху вала блока рукавних фільтрів в його зворотно-поступальний для періодичного струшування тонкодисперсного пилу з фільтрувальної поверхні рукавних фільтрів у збірну воронку 24. Вказана воронка розташована всередині циклона під блоком рукавних фільтрів (див. рис. 4.2.), в цій збірній воронці збирається тонкодисперсний пил, що струшується з фільтрувального матеріалу рукавних фільтрів.

На рис. 4.4. показана в кольорі частина верхнього диска 12 з опорними кулачками 14 (рухомий елемент), що входять у кільцеву впадину верхнього

фланця 15 (нерухомий елемент), який закриває ширшу частину корпусу циклону 1.

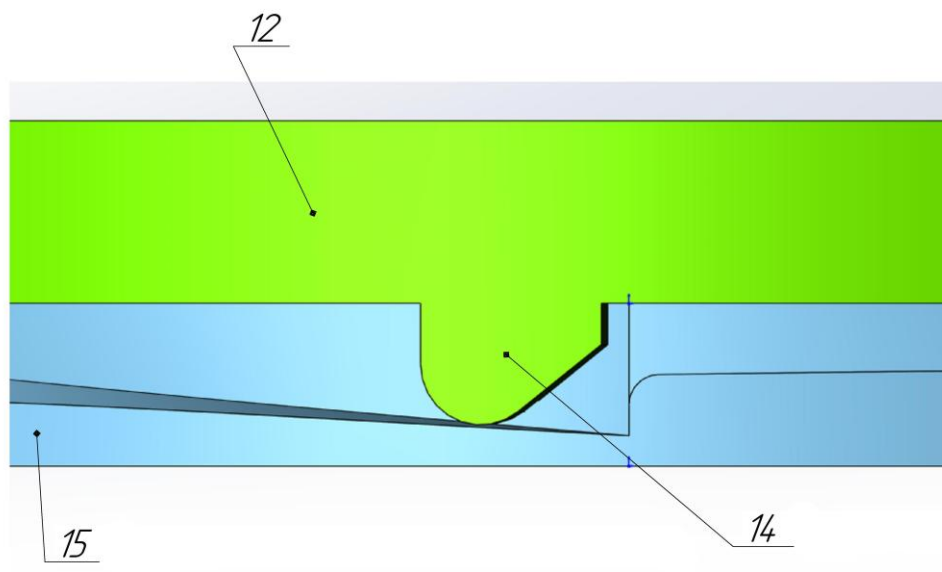


Рис. 4.4. – Елемент верхнього диска

Робота пиловловлюючої системи ґрунтується на принципі ефективного відокремлення частинок пилу з повітряного потоку. Запилене повітря, що надходить із робочої зони або технологічного обладнання під дією динамічного напору, спрямовується через вхідний патрубок 4 у нижню звужену частину циклона 1 дифузорного типу. Далі воно потрапляє в кільцевий простір між суцільною зовнішньою стінкою 2 та внутрішньою перфорованою стінкою 3.

У цій зоні встановлена спіральна направляюча 6, яка жорстко закріплена до внутрішньої стінки 3. Завдяки її конструкції повітряний потік набуває обертового руху, що сприяє ефективному осадженню пилових частинок. Під впливом відцентрових і гравітаційних сил частинки різної дисперсності поступово проходять через перфоровані отвори внутрішньої стінки 3. Найбільші й важчі частинки осідають першими, тоді як дрібніші рухаються далі та поступово випадають із потоку. Зрештою, очищені від забруднень частинки осідають і через патрубок 9 потрапляють у накопичувальний бункер. Важливо зазначити, що бункер не входить до складу самої пиловловлюючої системи, а виконує функцію збору уловлених забруднень.

Дрібнодисперсні частинки пилу разом із пилоповітряним потоком переміщуються у верхню розширену секцію циклона 1 дифузорового типу, де спрямовуються у внутрішню порожнину пристрою. У цій зоні на потік починає впливати акустичне поле, що генерується спеціальним акустичним випромінювачем 7, який має конструкцію кільцевого дифузора.

Даний випромінювач закріплений до внутрішньої частини конфузора, що герметично закриває верхню секцію циклона. Під дією створеного звукового поля дрібні частинки пилу піддаються процесу коагуляції - вони злипаються, формуючи більші агломерати. Це сприяє їх ефективнішому осадженню та подальшому відокремленню з повітряного потоку, покращуючи загальну продуктивність пиловловлюючої системи.

Після процесу акустичної коагуляції укрупнені частинки пилу під дією гравітації розподіляються на два основних потоки. Більші частинки осідають вниз і через патрубок 9 потрапляють у бункер для збору відходів. Дрібніші частинки, після відбиття від відділювача 8, також спрямовуються до накопичувального бункера. Однак найтонші частинки, які не пройшли процес коагуляції, потрапляють у спеціальну збірну воронку 24, звідки вони переміщуються до зони фільтрації.

Відділювач 8 виконує функцію остаточного очищення повітряного потоку і складається з блоку рукавних фільтрів, що забезпечують ефективне захоплення мікроскопічних частинок пилу. Фільтруючі рукави виготовляються з комбінації натуральних і синтетичних волокон, здебільшого органічних високомолекулярних полімерів, які підбираються залежно від температурного режиму пилоповітряної суміші.

Конструкція пиловловлюючої системи передбачає розміщення рукавних фільтрів на концентричних колах. Оптимальна кількість таких кіл визначається виходячи з продуктивності системи та інтенсивності утворення пилоповітряної суміші. Згідно з нашими рекомендаціями, мінімальна кількість концентричних кіл повинна становити три або чотири, як показано на рис. 4.3. Розташування рукавів у кожному конкретному випадку обирається з урахуванням необхідності

максимального обдування пилоповітряним потоком, що досягається шляхом зміни кутової відстані між рукавами на кожному рівні фільтраційної системи. У процесі роботи пиловловлюючої системи тонкодисперсні частинки пилу, що вловлюються, накопичуються на поверхні фільтрувального матеріалу рукавних фільтрів. З часом, із збільшенням шару пилу, ефективність фільтрації починає знижуватися. Щоб усунути цей недолік, у запропонованій системі передбачено механізм періодичного струшування, розроблений авторами.

Цей механізм складається з двох основних вузлів: верхньої частини корпусу циклона (фланець 15, що виконує роль нерухомого елемента) і верхнього диска 12 блоку рукавних фільтрів, оснащеного опорними кулачками 14 на нижній частині. Очищення фільтрувальної поверхні рукавних фільтрів за допомогою цього механізму здійснюється за наступним алгоритмом.

Очищене повітря виходить із внутрішньої частини рукавних фільтрів, верхні частини яких виступають за край диска 12 блоку фільтрів. Повітря потрапляє в камеру 19 чистого повітря, утворену верхнім фланцем 15 із нижнього боку та перегородкою 16 зверху. Далі повітря через повітропровід 23 надходить у камеру 20, діаметр якої менший, ніж у камери 19. У камері 20 на верхній частині вала 10 блоку фільтрів закріплена повітряна турбіна 21.

На рівні верхнього краю турбіни 21 розташоване сопло 22, яке прикріплене до внутрішньої сторони камери 20 і під'єднане до повітропроводу 23. Під дією реактивної сили повітряного струменя турбіна 21 починає обертатися, разом із нею обертається весь блок рукавних фільтрів. Опорні кулачки 14, розташовані на нижній поверхні диска 12, рухаються по кільцевій впадині верхнього фланця 15, який закриває верхню частину циклона.

Спеціальний профіль кільцевої впадини забезпечує підйом блоку рукавних фільтрів на початку руху, а потім його різке опускання під дією власної ваги. У цей момент пил, що накопичився на фільтрувальному матеріалі, струшується, відновлюючи фільтруючу здатність. Ця процедура повторюється у кожному циклі обертання. Залежно від конструктивних особливостей пиловловлюючої системи, за один повний оберт може виконуватися три-чотири таких цикли.

Кількість циклів визначається після апробації системи з урахуванням технологічних вимог.

Всі вимоги до роботи механізму та його конструкції враховуються у параметричному та конструктивному комплексах, які використовуються при проєктуванні та розрахунку пиловловлюючої системи.

Побудова пиловловлюючої системи з дотриманням всіх описаних вище умов забезпечує покращення її експлуатаційних характеристик, зокрема збільшує ефективність пиловловлення, а також забезпечується відділення тонкодисперсної фракції.

Застосування запропонованої системи, яка містить у своїй конструкції гармонійно поєднаних два окремих пристрої - циклон та рукавний фільтр в одній оболонці (чи складному корпусі), при цьому забезпечується автоматичне струшування вловленого тонкодисперсного пилу в спеціальну збірну воронку. А перед тим у міжкорпусному просторі циклону, завдяки спіральній направляючій, згідно описаним особливостям його конструкції суттєво підвищується сумарна ефективність пилоочищення. Використання такої системи пиловловлювання, зокрема у виробництві цементу, забезпечує отримання покращення екологічної ситуації в санітарно-захисній зоні, а за рахунок отримання тонкодисперсної фракції, виробник зможе отримати високо вартісний цемент, а у технологічному процесі отримання бетонних виробів їх міцність (а також вартість) також буде вищою [103].

Висновки до розділу 4.

1. Ефективний контроль забруднення потребує удосконалення законодавства та покращення міжвідомчої координації. Залучення місцевих громад та наукових установ до моніторингових програм сприятиме підвищенню прозорості екологічної політики та оперативному реагуванню на екологічні загрози.

2. Запропонована модернізована система пиловловлення, що поєднує циклон дифузорового типу, рукавні фільтри та акустичний випромінювач, забезпечує значне зниження концентрації тонкодисперсного пилу в промислових

викидах. Це сприяє покращенню якості атмосферного повітря та зменшенню негативного впливу цементного виробництва на довкілля.

3. Впровадження комбінованого методу пиловловлювання дозволяє не лише ефективно відокремлювати дрібнодисперсні частинки, а й забезпечує їх подальше використання у виробництві цементу. Це підвищує економічну ефективність підприємства та сприяє мінімізації промислових відходів.

4. Інтеграція механізму автоматичного струшування рукавних фільтрів забезпечує тривалий термін служби очисного обладнання та мінімізує витрати на обслуговування. Застосування такої технології істотно підвищує ефективність функціонування фільтраційних систем, знижуючи потребу в регулярному втручанні з боку обслуговуючого персоналу.

ВИСНОВКИ

1. Цементна промисловість є стратегічною галуззю економіки України, проте вона створює суттєве техногенне навантаження на довкілля. Основними забруднювачами є дрібнодисперсний пил (PM1, PM2.5, PM10), оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO₂), вуглекислий газ (CO₂) та важкі метали. Найбільшу екологічну небезпеку становлять тверді частинки, що легко проникають у дихальні шляхи людини. Для їхнього аналізу ефективним є застосування математичних моделей атмосферного розсіювання, зокрема AERMOD, яка враховує локальні метеоумови та топографію.

2. На прикладі ПрАТ «Івано-Франківськцемент» проаналізовано основні джерела пилового забруднення, серед яких домінують етапи випалу клінкеру, помелу цементу та транспортування сировини. Незважаючи на впровадження сучасного фільтраційного обладнання з ефективністю до 99,99%, в окремі часові проміжки фіксуються пікові перевищення концентрацій забруднювачів у сусідніх населених пунктах (Клузів, Ямниця). Це свідчить про необхідність додаткових заходів із герметизації технологічних процесів і вдосконалення моніторингу.

3. Розроблено математичну модель поширення цементного пилу, яка враховує метеорологічні умови, рельєф місцевості та характеристики джерел викидів. Експериментальна перевірка моделі підтвердила її ефективність: відхилення між розрахованими та реальними концентраціями не перевищує 20%, а коефіцієнт детермінації (R^2) становить 0,85–0,95. Результати моделювання дозволили побудувати карти розсіювання забруднення, що є дієвим інструментом для екологічного планування.

4. Рівень забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсними частинками (PM1, PM2.5, PM10) у зоні впливу підприємства перевищує фонові показники. Особливо небезпечними є частинки з діаметром менше 2,5 мкм, які фіксуються в повітрі навіть за наявності очисного обладнання. Це обґрунтовує необхідність подальшого вдосконалення методів контролю за якістю повітря в прилеглих житлових районах та визначення чутливих груп населення.

5. Запропоновано та апробовано конструкцію модернізованої пиловловлювальної системи, яка включає циклон дифузорового типу, блок рукавних фільтрів із механізмом автоматичного струшування та акустичний випромінювач. Така система забезпечує зменшення викидів пилу на 10–15%, покращення якості повітря та підвищення надійності очисних процесів за рахунок зниження витрат на обслуговування.

6. Обґрунтовано технічне рішення для повторного використання вловленого цементного пилу, яке дозволяє використовувати тонкодисперсну фракцію як добавку у виробництві високоякісного бетону. Це сприяє зменшенню кількості відходів, раціональному використанню ресурсів і підвищенню економічної ефективності підприємства. Результати дослідження можуть бути використані для формування сталих екологічних стратегій та інтеграції систем довготривалого моніторингу екосистем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цементна промисловість України [Електронний ресурс] // Вікіпедія. — URL https://uk.wikipedia.org/wiki/Цементна_промисловість_України
2. Цемент [Електронний ресурс] // Вікіпедія. — URL <https://uk.wikipedia.org/wiki/Цемент>
3. Цемент // Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ; за заг. ред. Р. А. Шмига. — Львів : [б. в.], 2010. — С. 207. — ISBN 978-966-7407-83-4.
- 4 Про затвердження Методики проведення інвентаризації викидів забруднюючих речовин на цементних заводах [Електронний ресурс]: Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 18.09.2023 № 1475. URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1475-23#Text>
5. Holmes N. S., Morawska L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available // Atmospheric Environment. — 2006. — Vol. 40, No. 30. — P. 5902–5928.
6. Ковшова О. "Які можливі шляхи врегулювання забруднення атмосферного повітря у цементній промисловості?" Журнал "ECOBUSINESS. Екологія підприємства", 2022. URL <https://ecolog-ua.com/news/yaki-mozhlyvi-shlyahy-vregulyuvannya-zabrudnennya-atmosfernogo-povitrya-u-cementniy-0>
7. Колочинська В. В. "Аналіз впливу важких металів на компоненти навколишнього середовища від підприємств цементного виробництва". Магістерська дисертація. Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2018. URL <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/22a924f9-d536-42f6-b938-a57fe6ddd12b/content>

8. Крамар О. "Зменшення викидів парникових газів у секторах виробництва цементу, мінеральних добрив та електроенергії". Аналітичний звіт. Громадська спілка "Біоенергетична асоціація України", 2024. URL https://uabio.org/wp-content/uploads/2024/10/20_Kramar_Zmenshennya-vykydiv-PG_tsement_mindobryva_EE_V6.pdf
9. "Екоінновації у цементному секторі: як законодавство ЄС про промислове забруднення приносить користь". Журнал "ECOBUSINESS. Екологія підприємства", 2020. URL <https://ecolog-ua.com/news/ekoinnovaciyi-u-cementnomu-sektori-yak-zakonodavstvo-yes-pro-promyslove-zabrudnennya-prynosyt>
10. Карстенсен К.Х. Вдосконалення технології виробництва цементу відповідно до цілей фактору 2 / К.Х. Карстенсен // Журнал "Чисте виробництво". – 2007. – Т. 15, № 13–14. – С. 1128–1132.
11. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації : аналіт. доповідь / [С. П. Іванюта, О. О. Коломієць, О. А. Малиновська, Л. М. Якушенко] ; за ред. С. П. Іванюти. – Київ: НІСД, 2020. – 110 с.
12. Al-Hassoun, O.A., Shawabkeh, R.A. Distribution of metals in soils around the cement factory in southern Jordan / O.A. Al-Hassoun, R.A. Shawabkeh // Environmental Pollution. – 2006. – Vol. 140, No. 3. – P. 387–394.
13. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide / Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau. – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). – 2013. – 501 p.
14. European Cement Association (CEMBUREAU). The role of cement in the 2050 low carbon economy. – Brussels, 2013. URL https://cembureau.eu/media/cpvoin5t/cembureau_2050roadmap_lowcarboneyconomy_2013-09-01.pdf
15. UN Environment Programme. Cement Industry: Energy and CO₂ Performance. – Paris, 2010. URL <https://docs.wbcsd.org/2011/05/CSI-CO2-Protocol.pdf>

16. International Finance Corporation (IFC). Environmental, Health, and Safety Guidelines for Cement and Lime Manufacturing. – Washington, D.C., 2007. URL <https://documents1.worldbank.org/curated/zh/681871489639027962/pdf/113555-WP-ENGLISH-Cement-and-Lime-Manufacturing-PUBLIC.pdf>
17. Karstensen, K.H. Guidelines for co-processing of alternative fuels and raw materials and treatment of organic hazardous wastes in cement kilns. – UNEP, 2008. URL <https://sawic.environment.gov.za/documents/461.pdf>
18. Василенко В.М., Тарасенко О.А. Екологічні аспекти виробництва цементу / В.М. Василенко, О.А. Тарасенко // Екологічна безпека та природокористування. – 2015. – № 1. – С. 35–40.
19. Василенко В.М. Аналіз впливу цементної промисловості на навколишнє середовище / В.М. Василенко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2010. – № 668. – С. 28–33.
20. Державна служба статистики України. Статистичний збірник "Охорона навколишнього природного середовища в Україні". – Київ, 2020.
21. Alloway, B.J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. – Springer, 2013. URL <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2999802>
22. Верховна Рада України. Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" №1264-XII від 25.06.1991.
23. Adak, M.D., Adak, S., Purohit, K.M. Air quality and health hazards near small-scale cement plants / M.D. Adak, S. Adak, K.M. Purohit // Pollution Research. – 2007. – Vol. 26, No. 3. – P. 361–364. URL <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1525223>
24. Al-Khashman, O.A., Shawabkeh, R. Metal Distribution in Soils around the Cement Factory in Southern Jordan / O.A. Al-Khashman, R. Shawabkeh // Environmental Pollution. – 2006. – Vol. 140. – P. 387–394. URL <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2915347>

25. Chaurasia, S., Ahmad, I., Gupta, A.D., Kumar, S. Assessment of air pollution emission from Cement Industries in Nimbahera, Rajasthan, India / S. Chaurasia, I. Ahmad, A.D. Gupta, S. Kumar // International Journal of Environmental Sciences. – 2012. – Vol. 2, No. 3. – P. 1904–1910. URL https://www.researchgate.net/publication/328052416_Assessment_of_air_pollution_emission_from_Cement_Industries_in_Nimbahera_Rajasthan_India
26. EPA-454/R-03-004. AERMOD: Description of model formulation. – 2004. URL https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_mfd_454-R-03-004.pdf
27. Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model / J.S. Scire, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino. – Earth Tech, Inc., 2000. URL https://www.calpuff.org/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf
28. European Environment Agency (EEA). Guidance on the use of models under the European Air Quality Directive. – Copenhagen: EEA, 2010.
29. CERC (Cambridge Environmental Research Consultants). ADMS 5 User Guide. – Cambridge: Cambridge Environmental Research Consultants Ltd, 2023. URL <https://www.cerc.co.uk/environmental-software/user-guides.html>
30. Carruthers, D.J., Edmunds, H.A., Ellis, K.N., McHugh, C.A., & Singles, R.J. Use and validation of ADMS urban in contrasting urban and industrial locations / D.J. Carruthers, H.A. Edmunds, K.N. Ellis, C.A. McHugh, R.J. Singles // International Journal of Environment and Pollution. – 2000. – Vol. 14, No. 1-6. – P. 364–374. URL <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/fairmode>
31. Hood, C., Stocker, J., Carruthers, D., McHugh, C., & Johnson, K. ADMS-Urban: developments in modelling dispersion from the city scale to the local scale / C. Hood, J. Stocker, D. Carruthers, C. McHugh, K. Johnson // International Journal of Environment and Pollution. – 2014. – Vol. 54, No. 2-4. – P. 160–170.

32. Stocker, J., Hood, C., Carruthers, D., McHugh, C., & Johnson, K. ADMS-Urban: developments in modelling dispersion from the city scale to the street scale / J. Stocker, C. Hood, D. Carruthers, C. McHugh, K. Johnson // International Journal of Environment and Pollution. – 2012. – Vol. 50, No. 1-4. – P. 308–316.
33. Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., & Ngan, F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system / A.F. Stein, R.R. Draxler, G.D. Rolph, B.J.B. Stunder, M.D. Cohen, F. Ngan // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2015. – Vol. 96, No. 12. – P. 2059–2077.
34. NOAA Air Resources Laboratory. HYSPLIT Model User's Guide. URL <https://www.ready.noaa.gov/hysplitusersguide/S000.htm>
35. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model AERMOD. – EPA-454/B-21-001, 2018. URL <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1012JFP.PDF?Dockkey=P1012JFP.PDF>
36. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). AERMOD: Description of Model Formulation. – EPA-454/R-03-004, 2004. URL https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_mfd_454-R-03-004.pdf
37. Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model / J.S. Scire, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino. – Earth Tech, Inc., 2000.
38. Venkatram, A., Brode, R.W., Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Weil, J.C., & Paine, R.J. A complex terrain dispersion model for regulatory applications / A. Venkatram, R.W. Brode, A.J. Cimorelli, S.G. Perry, J.C. Weil, R.J. Paine // Atmospheric Environment. – 2001. – Vol. 35, No. 24. – P. 4211–4221.
39. Carruthers, D., McHugh, C., Dyster, S., Stocker, J., Ellis, K., & Smith, S. ADMS 5: An advanced dispersion model for air pollution and its application / D. Carruthers, C. McHugh, S. Dyster, J. Stocker, K. Ellis, S. Smith // International Journal of Environment and Pollution. – 2012. – Vol. 50, No. 1/2/3/4. – P. 308–316.

40. Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., & Ngan, F. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System / A.F. Stein, R.R. Draxler, G.D. Rolph, B.J.B. Stunder, M.D. Cohen, F. Ngan // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2015. – Vol. 96, No. 12. – P. 2059–2077.
41. Holmes, N.S., Morawska, L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available / N.S. Holmes, L. Morawska // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40, No. 30. – P. 5902–5928.
42. European Environment Agency (EEA). Guidance on the use of models for the European Air Quality Directive. – EEA Technical Report No 10/2011, 2011.
43. Міністерство екології та природних ресурсів України. Методичні рекомендації щодо застосування моделі AERMOD для оцінки забруднення атмосферного повітря. – Київ, 2018.
44. Геологія і геодезія Івано-Франківська і Івано-Франківської області. URL <https://geoplan.com.ua/ua/blog-ua/geological-surveys-ua/geologiya-i-geodeziya-ivano-frankivska-ta-ivano-frankivskoi-oblasti/>
45. Управління екології та природних ресурсів Івано-Франківської обласної державної адміністрації. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Івано-Франківській області за 2022 рік. – Івано-Франківськ, 2023. URL <https://www.if.gov.ua/storage/app/sites/24/documentu-2023/Rehional%CA%B9na%20dopovid%CA%B9%20pro%20stan%20navkolyshn%CA%B9oho%20pryrodnoho%20seredovyshcha%20v%20oblasti%20u%202022%20rotsi.pdf>
46. Управління екології та природних ресурсів Івано-Франківської обласної державної адміністрації. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Івано-Франківській області за 2023 рік. – Івано-Франківськ, 2024. URL https://www.if.gov.ua/storage/app/sites/24/uploaded-files/_%D0%94%D0%9E%D0%9F%D0%9E%D0%92%D0%86%D0%94%D0%AC_2023.pdf

47. Український гідрометеорологічний центр [Електронний ресурс].URL <http://meteo.gov.ua>
48. Данилів О.О. Ґрунтові ресурси Івано-Франківської області та їх охорона // Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. – 2022. – Випуск 2. – С. 18–22. DOI <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2022-2-18-22>
49. Паньків З.П. Ґрунти України: навчально-методичний посібник - Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. – 112 с.URL <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/grunty-Ukraine-Pankiv.pdf>
50. Метеорологія і кліматологія: навчальний посібник / Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. – Харків, 2020. URL <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2020/05/12-meteorologija-i-klimatologija.pdf>
51. Івано-Франківськцемент // Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Івано-Франківськцемент>
52. Івано-Франківський цементний завод // frankivsk.name. URL: <https://frankivsk.name/uk/eternal-5946-ivano-frankivskyj-czementnyj-zavod>
53. Про компанію // ПрАТ «Івано-Франківськцемент». URL: <https://www.ifcem.if.ua/pro-kompaniyu>
54. Скриннікова О.В. Технології очищення відхідних пилогазових викидів в цементній промисловості: бакалаврська робота. – Суми: Сумський державний університет, 2023. – 47 с. – URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/91965/1/Skrynnikova_bak_rob.pdf
55. Організація контролю викидів шкідливих речовин цементного виробництва // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Актуальні проблеми інженерної екології". – Кропивницький: КНТУ, 2019. – С. 122–127. – URL: [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/5\(36\)_I/22.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/5(36)_I/22.pdf)

56. Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry." *Cement and Concrete Research*, 2018, Vol. 114, pp. 2–26.
57. Узунова Г.Д. Вплив цементного виробництва на стан довкілля міста Одеса // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Екологічна безпека: проблеми та шляхи вирішення". – Одеса: ОДЕКУ, 2018. – С. 114–119. – URL: https://eprints.library.odeku.edu.ua/1149/1/UzunovaGD_KEOD_MKR_W2018.pdf
58. Куян Є.С. Технології захисту навколишнього середовища: курсова робота. – Дніпро: Національний гірничий університет, 2019. – 32 с. – URL: <https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/161580/КР%20Куян%20ЄС%20183м-19з-1.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
59. Оцінка ефективності екологічної модернізації підприємств цементної промисловості // Вісник Ужгородського національного університету. Серія: Економіка. – 2019. – Вип. 23(1). – С. 85–89. – URL: https://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/23_1_2019ua/17.pdf
60. AirFresh: пристрій моніторингу якості повітря на вулиці // Beegreen. URL: <https://beegreen.com.ua/airfresh-pristryy-mon%D1%96toringu-jakosti-pov%D1%96trja-vulic%D1%96-16519>
61. Вікіпедія: вільна енциклопедія. Індекс якості повітря [Електронний ресурс] // Вікіпедія. – URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Індекс_якості_повітря
62. Екологічний норматив якості атмосферного повітря // Словник-довідник з екології : навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. — Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. — С. 79.
63. Індекс забруднення атмосфери // Словник-довідник з екології : навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. — Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. — С. 102.

64. Wang, Q., et al. "Global health impacts of airborne particulate matter." *Science of The Total Environment*, 2020. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.14131562
65. Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., et al. "Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association." *Circulation*, 2010. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.109.893461
66. Бахарєв В.С. Екологічна безпека регіону в умовах техногенного пилового забруднення атмосферного повітря: дис... канд.. техн. наук: 21.06.01 / В. С. Бахарєв. – Кременчук, 2005. – 179 с.
67. Мокін В. Б. Моделювання поширення забруднювальних речовин у повітрі міста з використанням геоінформаційних технологій / В. Б. Мокін, І.В. Варчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 5. — С. 13-18.
68. Пляцук Л.Д. Підвищення якості атмосферного повітря на основі управління екологічною безпекою промислового підприємства/ Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець // *Sciences of Europe*. – VOL 1, No 3 (3) (2016). – p. 62-66.
69. WHO. "Air Quality Guidelines: Global Update 2021." URL <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
70. Pope, C. A., Dockery, D. W. "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect." *Journal of the American College of Cardiology*, 2019. DOI: 10.1016/j.jacc.2019.05.001
71. Zhang, R., et al. "Impacts of atmospheric aerosols on agricultural productivity." *Environmental Pollution*, 2021. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115925
72. Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. "Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change." Wiley-Interscience, 2016. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Atmospheric+Chemistry+and+Physics>
73. Advanced Grapher 2.2 / Alentum Software, Inc. [Електронний ресурс]. – 2009. – URL <http://www.alentum.com/agrapher/>
74. MBV № 081/12-0161-05. Викиди газопилові промислові. Методика виконання вимірювань масової концентрації речовини у вигляді суспендованих твердих

частинок в організованих викидах стаціонарних джерел гравіметричним методом. – Київ, 2005.

75. Козій І.С. Використання апаратів мокрого пилоочищення при виробництві двоокису титану / І.С. Козій, Л.Л. Гурець // Матер. V Міжнар. ювілейної наук.-практ. конф. «Екологія. Економіка. Енергозбереження» (м. Суми, 14–16 трав. 2009 р.). – С. 39.

76. Полутренко М.С. Підвищення ефективності систем пилоочищення з використанням розроблених модифікованих апаратів. / М.С. Полутренко, Н.М. Параняк // - Міжвузівський зб., “Наукові нотатки”, - м. Луцьк, 2015., вип. 52, с. 54-59.

77. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. – 1328 с.

78. Turner D.B. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling. – Практичний посібник, що містить основи використання рівняння Гаусса для розрахунків розсіювання. – 2-ге вид. – Boca Raton: CRC Press. – 192 с.

79. Лацик Н. В., Петрушка І. М. Моделювання процесу поширення дрібнодисперсного пилу в атмосфері житлових районів // Науковий вісник НЛТУ України. – 2024. – Т. 34, № 7. – С. 23–29. <https://doi.org/10.36930/40340703>.

80. Радомська М. М., Страва Т. В., Колотило О. А. Дослідження стану атмосферного повітря Святошинського району міста Києва методом ліхеноіндикації // Scientific Bulletin of UNFU. – 2016. – Т. 26, № 1. – С. 190-195. DOI: 10.15421/40260128.

81. Узунова Г. Д. Характеристика впливу підприємств будівельної галузі на повітряний басейн м. Одеса // Матеріали наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ 2017. – Харків: ФОП Панов А. М., 2017. – С. 161.

82. Петрушка І. М., Лацик Н. В., Кулик М. П. Пиловловлююча система: Патент 155139 Україна: B01D 29/00, B01D 46/02. № у 2022 02724; подано 24.08.2023; опубліковано 24.01.2024; Бюлетень № 4.

83. Latsyk N., Petrushka I. Improvement of the system for cleaning dust gas flows using an aerodynamic insert // *Journal Environmental Problems*. – 2024. – Т. 9, № 1. – С. 59–64.
84. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. – Wiley, 2021.
85. Gujarati D. N., Porter D. C. *Basic Econometrics*. – McGraw-Hill, 2017.
86. Wooldridge J. M. *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. – Cengage, 2020.
87. Borodin A. L., Krylach S. I. Influence of soil structure parameters created by preseeded tillage and their dynamics on moisture supply of corn // *Агрохімія і ґрунтознавство*. – 2015. – № 84. – С. 128-133.
88. Петрушка І. М., Петрушка К. І., Лацик Н. В., Мушинський В. О. Використання регресійної моделі, як статистичного інструменту прогнозування поширення цементного пилу в атмосфері // *Грааль науки*. – 2025. – № 49: Proceedings of the IV Correspondence international scientific and practical conference «Science in motion: classic and modern tools and methods in scientific investigations», February 21st, 2025. – P. 199–203. URL: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/issue/view/21.02.2025/37>
89. Lindenmayer, D. B., & Likens, G. E. (2018). *Effective Ecological Monitoring*. CSIRO Publishing. ISBN: 978-1486308927
90. Lovett, G. M., Burns, D. A., Driscoll, C. T., Jenkins, J. C., Mitchell, M. J., Rustad, L., & Likens, G. E. (2007). Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(5), 253–260.
91. Lindenmayer, D.B., & Likens, G.E. "Effective Ecological Monitoring." CSIRO Publishing, 2010. URL: <https://www.publish.csiro.au/book/6895/>
92. Parr, T.W., Ferretti, M., Simpson, I.C., Forsius, M., & Kovács-Láng, E. "Towards a long-term integrated monitoring programme in Europe: Network design in theory and practice." *Environmental Monitoring and Assessment*, 78(3), 2002, pp. 253-290. DOI: 10.1023/A:1019968615187

93. Vos, P., Meelis, E., & Ter Keurs, W.J. "A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management." *Environmental Monitoring and Assessment*, 61(3), 2000, pp. 317-344. DOI: 10.1023/A:1006139401210
94. Danielsen, F., Burgess, N.D., & Balmford, A. "Monitoring matters: examining the potential of locally-based approaches." *Biodiversity & Conservation*, 14(11), 2005, pp. 2507-2542. DOI: 10.1007/s10531-005-8375-0
95. Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., & Steininger, M. "Remote sensing for biodiversity science and conservation." *Trends in Ecology & Evolution*, 18(6), 2003, pp. 306-314. DOI: 10.1016/S0169-5347(03)00070-3
96. Hardisty, A., & Roberts, D. "A decadal view of biodiversity informatics: challenges and priorities." *BMC Ecology*, 13(1), 2013, p. 16. DOI: 10.1186/1472-6785-13-16
97. Johnson, R.K., & Hering, D. "Response of taxonomic groups in streams to gradients in resource and habitat characteristics." *Journal of Applied Ecology*, 46(1), 2009, pp. 175-186. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2008.01596.x
98. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Офіційний вебсайт. URL <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichnyj-monitoryng-dovkillya/>
99. UNEP. "Global Environment Outlook 6: Key Messages." United Nations Environment Programme, 2020. URL <https://www.unep.org/resources/geo-6-key-messages>
100. EEA. "The European Environment: State and Outlook 2020." European Environment Agency, 2019. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020>
101. Zannetti, P. "Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software." Springer, 1990. DOI: 10.1007/978-1-4757-4463-1
102. Hardisty, A., Roberts, D. "A decadal view of biodiversity informatics: challenges and priorities." *BMC Ecology*, 2013. DOI: 10.1186/1472-6785-13-16
103. Latsyk, N., Petrushka I., Improvement of the system for cleaning dust gas flows using an aerodynamic insert. *Journal Environmental Problems*. – 2024. - 9(1), - P.59 - 64. <https://doi.org/10.23939/ep2024.03.144>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Поетапне розв'язання задачі оптимізації концентрації цементного пилу.

1. Постановка задачі.

Метою є максимізація функції концентрації цементного пилу:

$$f(X, Y) = \frac{(Y \times 158,24 \times 17,2 \times X)(X^{0,754} \times Y^{0,15})}{2,24 \times X^{0,94}}$$

де: X - відстань до джерела викиду (м);

Y - висота від землі (м);

158,24 і 17,2 - коефіцієнти, що враховують параметри джерела та метеорологічні характеристики.

Задача полягає у знаходженні таких значень X і Y , при яких функція $f(X, Y)$ досягає максимуму в межах: $12 \leq X \leq 20$, $23 \leq Y \leq 58$.

2. Обґрунтування граничних умов

X : Діапазон від 12 до 20 м обрано на основі санітарно-захисної зони підприємства, де спостерігається найбільше осідання пилу.

Y : Висота від 23 до 58 м відповідає типовим висотам джерел викиду (наприклад, висота труби цементного заводу) або рівням, на яких проводились вимірювання концентрації пилу.

3. Метод розв'язання

Для знаходження максимуму функції $f(X, Y)$ використано чисельний метод оптимізації з використанням Wolfram Alpha. Вхідні дані та обмеження були задані наступним чином:

```
maximize ((Y*158.24*17.2*X)*(X^0.754*Y^0.15))/(2.24*X^0.94)
subject to 12 ≤ X ≤ 20 and 23 ≤ Y ≤ 58
```

4. Результати обчислень

Wolfram Alpha визначив, що функція $f(X, Y)$ досягає максимуму при: $X=20$, $Y=58$.

Максимальне значення функції:

$$f_{max} = \frac{(6737932912839621 \times 2^{\frac{389}{500}} \times 5^{\frac{407}{500}} \times 29^{\frac{3}{20}})}{47804853377}.$$

maximize($Y \cdot 158.24 \cdot 17.2 \cdot X \cdot (X^{0.754} \cdot Y^{0.15}) / (2.24 \cdot X^{0.94})$) in $12 \leq X \leq 20; 23 \leq Y \leq 58$

Interpreting as: maximize($Y \cdot 158.24 \cdot 17.2 \cdot X \cdot (X^{0.754} \cdot Y^{0.15}) / (2.24 \cdot X^{0.94})$) in $12 \leq X \leq 20; 23 \leq Y \leq 58$

Input Interpretation

maximize	function	$(Y \times 158.24 \times 17.2 \cdot X) \times \frac{X^{0.754} Y^{0.15}}{2.24 X^{0.94}}$
	domain	$12 \leq X \leq 20 \wedge 23 \leq Y \leq 58$

Global maximum

Approximate form

$$\max \left\{ \frac{(Y \cdot 158.24 \times 17.2 \cdot X) (X^{0.754} Y^{0.15})}{2.24 X^{0.94}} \mid 12 \leq X \leq 20 \wedge 23 \leq Y \leq 58 \right\} = \frac{6737932912839621 \times 2^{\frac{389}{500}} \times 5^{\frac{407}{500}} \times 29^{\frac{3}{20}}}{47804853377} \text{ at } (X, Y) = (20, 58)$$

5. Графічна інтерпретація

Для візуалізації результатів побудовано графік функції $f(X, Y)$ у заданому діапазоні X і Y (рис.3.5). Графік демонструє, що максимальне значення концентрації пилу досягається при максимальних значеннях X і Y у заданому діапазоні.

Отримані результати свідчать про те, що максимальна концентрація цементного пилу спостерігається на відстані 20 м від джерела викиду та на висоті 58 м. Це узгоджується з фізичними процесами розсіювання пилу в атмосфері та підтверджує ефективність використаної математичної моделі для прогнозування розподілу забруднюючих речовин.

ДОДАТОК Б. Акт про використання у навчальному процесу.



Проректор
з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
Олег ДАВИДЧАК
25.04. 2025 р.

АКТ

про використання у навчальному процесі
Національного університету «Львівська політехніка»
результатів досліджень та розробок,
одержаних при виконанні дисертаційної роботи
«Підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря підприємств
будівельної промисловості (на прикладі ПРАТ «Івано-Франківськцемент»)
Лацик Наталії Володимирівни

Комісія у складі:

- голова науково-методичної ради ІСТР ім. В'ячеслава Чорновола,
к.е.н., доц. Тетяна ДАНЬКО,
- зав. каф. ЕБПД д.т.н., проф. Ігор ПЕТРУШКА,
- к.т.н., доц. Анна Гивлюд,
- к.т.н., доц. Алла ШИБАНОВА

цим актом підтверджує, що основні положення та результати дисертаційної роботи «Підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря підприємств будівельної промисловості (на прикладі ПРАТ «Івано-Франківськцемент» Лацик Наталії Володимирівни на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101. Екологія будуть використані:

1. У програмі лекційного курсу «Інженерні методи захисту довкілля ч.1», а саме у розділі Тема 5. «Розділення неоднорідних систем у полі відцентрових сил», оскільки отримані результати стосуються методів очищення забрудненого повітря викидами продуктів цементної промисловості.
2. Рекомендується за результатами дисертаційної роботи розробити практичну роботу щодо розрахунку ефективності використання модифікованих відцентрових пиловловлювачів відповідно отриманого підтвердження патенту на корисну модель.

Голова НМР ІСТР

к.е.н., доц.

Члени комісії:

- зав. каф. ЕБПД д.т.н., проф.
- к.т.н., доц.
- к.т.н., доц.

Тетяна ДАНЬКО

Ігор ПЕТРУШКА

Анна ГИВЛЮД

Алла ШИБАНОВА