

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

КОЗІЙ ІВАН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 502.171:[504.5:628.511](477)(043.5)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**НАУКОВІ ОСНОВИ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ  
ДО ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ  
ВІД ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ НА ДОВКІЛЛЯ**

Спеціальність 21.06.01 – Екологічна безпека

Галузь знань – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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



І. С. Козій

Науковий консультант    Пляцук Леонід Дмитрович, доктор технічних наук,  
професор

Суми – 2023

## АНОТАЦІЯ

***Козій І. С.* Наукові основи системного підходу до зниження техногенного навантаження від промислових викидів на довкілля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук (доктора наук) за спеціальністю 21.06.01 – Екологічна безпека. – Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2023.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04. Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню наукової проблеми зниження рівня техногенного навантаження на довкілля від промислових викидів виробництв хімічної промисловості, підприємств теплоенергетики і машинобудування, зокрема у промислово-розвинених регіонах, що супроводжується комплексним негативним впливом на усі складові природні компоненти, особливо під час аварійних та залпових викидів на виробництвах та інших ситуацій, які спричиняють порушення екологічної рівноваги навколишнього природного середовища.

Дисертаційна робота виконана у рамках інтеграції до Європейського союзу – імплементація Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди. Для досягнення реформування українського законодавства в дисертаційній роботі проведено комплексний аналіз і розробка методичних рекомендацій з усунення відставання від європейських стандартів, підвищення екологічної свідомості населення та залучення громадськості до процесів вирішення екологічних проблем.

Розроблено науково-методологічні основи системного підходу до зниження впливу техногенних викидів промислових виробництв, які містять дрібнодисперсні зважені речовини (PM<sub>2.5</sub>), та екологічно орієнтованих підходів щодо комплексних технологічних рішень для зниження їх рівня

впливу. Створено алгоритм та програмні рішення для підбору пилогазоочисного обладнання з використанням інформаційних баз даних.

Одним з основних методів забезпечення безпечного екологічного стану довкілля є попередження забруднень шляхом прогнозування та вживання необхідних природоохоронних заходів. Проведено дослідження рівня забруднення повітря дрібнодисперсними зваженими речовинами (PM<sub>2.5</sub>) по всій території України, в найбільших українських містах і регіонах із розвинутою промисловістю.

Вирішення проблеми забруднення атмосферного повітря пилогазовими викидами промисловості потребує комплексного підходу та співпраці між різними сторонами, включаючи підприємства, місцеві органи влади та громадськість. Запропоновано рекомендації для оперативного вирішення питання забруднення повітря в Україні:

1. Проведення оцінки впливу на довкілля промислових підприємств: проведення детальної оцінки впливу технологічних процесів на довкілля, враховуючи кількість викидів, склад і токсичність речовин, які викидаються в атмосферу. Це допоможе визначити найбільш проблемні ділянки і складність проблеми.

2. Використання систем з прогнозування та оцінки потенційних негативних наслідків від надходження викидів забруднюючих речовин в приземний шар атмосфери.

3. Використання ефективного пилогазоочисного обладнання: встановлення сучасних систем фільтрації та комплексного очищення викидів може зменшити кількість шкідливих викидів і підвищити рівень якості атмосферного повітря для населення і довкілля у цілому.

4. Використання енергоефективних технологій: застосування енергоефективних технологій може зменшити викиди в атмосферу та знизити витрати на електроенергію, знижуючи споживання палива.

5. Співпраця із громадськістю: співпраця з місцевою громадськістю, екологічними організаціями та урядовими органами може допомогти у

вирішенні проблем забруднення атмосферного повітря. Це може включати інформування мешканців про ризики забруднення, виконання регулярних перевірок викидів підприємств та спільні ініціативи з покращення якості повітря.

Встановлено, що закономірності формування екологічної небезпеки і особливостей її проявів повинне служити базисом для розробки системи управління екологічною безпекою. Одним з основних методів забезпечення безпечного екологічного стану довкілля є попередження забруднень шляхом прогнозування та вживання необхідних природоохоронних заходів.

В роботі проведено дослідження впливу викидів дрібнодисперсного пилу на здоров'я населення та встановлення взаємозв'язку між обсягами викидів та кількістю захворювань систем кровообігу в Україні. Порівняльний аналіз одержаних результатів дозволив установити, що захворюваність людини на хвороби системи кровообігу більшою мірою спричинена викидами твердих часток розміром до 2,5 мкм.

Заходи щодо зниження техногенного впливу від викидів  $PM_{2.5}$  можуть бути презентовані технічними та інструментальними засобами, прогнозуванням поширення викидів і реалізацією громадського контролю через інформування громадськості на різних рівнях. Розроблення та впровадження моделей поширення забруднюючих речовин в атмосфері є важливим завданням на шляху до Євроінтеграції законодавчо-нормативної бази України згідно з Директивою 2010/75/ЄС Промислові викиди.

Передумовою для побудови математичної моделі розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин було вирішення наступних завдань:

- дослідження проблеми невизначеності вихідних даних математичної моделі параметризованого рівняння перенесення забруднюючих речовин в атмосфері;

- одержання аналітичних розв'язків та побудови відповідних алгоритмів чисельного моделювання процесу розсіювання забруднюючих речовин (відповідні ітераційні та рекурсивні обчислювальні алгоритми);



– розроблення алгоритмів та програмної реалізації моделі розсіювання для забезпечення прогнозування рівнів забруднення приземного шару атмосфери дрібнодисперсними зваженими речовинами.

Вихідним рівнянням для розробки математичної моделі стало тривимірне рівняння поширення домішок у турбулентному середовищі. Відповідно до методу покоординатного розщеплення, розв'язок задачі було розбито на три частини для різних моментів часу, і в подальшому було виконано умови параметризації, нормування параметрів і функцій, нормування початкових і граничних умов.

Включення в загальну схему алгоритмів процедур апроксимації на заданому інтервалі вихідних функцій дозволило отримати в алгоритм математичної моделі. Виконавши нормування початкових і граничних умов, нормованих параметрів було отримано рівняння, яке є функцією розподілу домішок в приземному шарі атмосфери на основі рівняння поширення домішок у турбулентному середовищі. На основі цієї функції було реалізовано повний центральний ортогональний композиційний план другого порядку. Для подальшої можливості порівняння значень концентрації, швидкості і температури нормували вхідні змінні за формулами вибіркового середнього значення. Для оцінки точності отриманої моделі обчислювалися суми квадратів відхилень експериментальних значень вихідних змінних від розрахункових.

Адекватність математичної моделі для розрахунку розсіювання дрібнодисперсних речовин перевірялась за критерієм Фішера, а оцінка значимості коефіцієнтів моделі проводилася на основі розподілу Стюдента. Програмний алгоритм розрахунку математичної моделі розсіювання дрібнодисперсних забруднюючих речовин вимагає сучасного комп'ютерного програмного забезпечення, яке доступне більшості користувачів. Розрахунок займає 30–40 хвилин для кожної нової початкової умови, що є перевагою запропонованої моделі. Перевірка адекватності математичної моделі на основі графічних візуалізації розрахунків вказує на ефективність прийнятої моделі,

що відповідає умовам чинного законодавства з урахуванням різних вихідних параметрів джерел викидів та умов розподілу домішок.

З метою спрощення можливостей використання розробленої моделі широкому колу представників громадськості було створено Web-додаток оцінки дальності поширення дрібнодисперсних забруднюючих речовин від джерела їх викидів, який може використовуватись в системах моніторингу для інформування та контролю викидів промислових підприємств на різних рівнях.

Розроблено науково-методологічні підходи до дослідження та аргументування до впровадження у виробництві ефективних технологій зниження викидів дрібнодисперсних зважених речовин, що дозволяє підвищити рівень екологічної безпеки відповідних територій.

Обґрунтовано потребу в розробці алгоритму та програмного забезпечення для вибору природоохоронного обладнання з метою захисту та збереження довкілля, що відповідає ключовим цілям сталого розвитку суспільства. Для цього було проведено аналіз баз даних параметрів забруднюючих речовин, умов проведення процесу очищення викидів та параметрів пилогазоочисного обладнання. Дослідження баз даних дозволяє реалізувати обґрунтовані напрями з вибору природоохоронного обладнання шляхом використання математичного та програмного системного підходу.

Вперше розроблено системний підхід до вибору пилогазоочисного обладнання за допомогою методу графів. Використання цього методу дозволяє отримати алгоритмічне пояснення вибору певних типів очисного обладнання. Враховуючи різні фізичні особливості роботи обладнання та умови середовища, запропонований метод дозволяє обирати найбільш ефективні технологічні рішення з урахуванням кількості викидів та відповідних параметрів. Використання методу графів відкриває нові можливості для вирішення проблем природоохоронного характеру в галузі пилогазоочищення.

Обґрунтовано і реалізовано параметризовану оптимізацію, яка була проведена у вигляді графа спрямованого вибору пилоочисного апарату, що реалізується  $n$  кількістю методів. Запропонована модель дозволяє побудувати матрицю суміжності методів, яка має розмірність  $m \times n$  за кількістю аналізованих методів та складності розв'язання задачі. Відповідно до матриць суміжності побудовано мережеву модель вибору обладнання. Для спрямованого вибору обладнання необхідно визначити найкоротший шлях в мережевій моделі, а оптимізаційна задача вирішується за допомогою методу лінійного програмування. При цьому критерії якості процесу повинні знаходитися в межах допустимих значень, з урахуванням обсягів викидів, потужності обладнання та можливості ефективної роботи, а також обмеження, пов'язані з умовами технологічного середовища. Оптимальним вважається варіант технологічного обладнання, яке забезпечує мінімальний вибір пилогазоочисного обладнання з найбільш ефективним затриманням забруднюючих речовин. Була розроблена блок-схема умов вибору технологічного устаткування з урахуванням послідовного ієрархічного порівняння кластерів елементів.

Запропоновано та реалізовано методику і алгоритм вибору природозахисного обладнання для зниження викидів забруднюючих речовин промисловими підприємствами у програмному середовищі сервісу Google-Таблиці. Використання сервісу Google-Таблиці спрощує використання методики вибору обладнання і робить її доступною широкому числу користувачів на комп'ютерах з підтримкою файлів у форматі \*.xlsx або режимі онлайн. Програмна реалізація розробленого алгоритму заснована на методі послідовної ієрархічної кластеризації та зіставленні параметрів трьох баз даних: характеристик забруднюючих речовин, технологічних умов середовища та параметрів пилогазоочисного обладнання. Послідовне зіставлення характеристик (кластерів) баз даних дозволяє отримати оптимальне значення характеристик технологічного рішення з урахуванням характеристик забруднюючої речовини та умов середовища цього процесу. З

метою послідовного порівняння кластерів трьох баз даних використовували формальні умови ДОРІВНЮЄ, БІЛЬШЕ, МЕНШЕ, ДОРІВНЮВАТИМЕ, вбудовані логічні команди TRUE або FALSE та таблиці істинності умов відповідності параметрів.

Програмне рішення алгоритму вибору природозахисного обладнання характеризується зручністю та швидкістю роботи, можливістю доповнення баз даних забруднюючих речовин та технологічного обладнання. У разі вибору з бази обладнання кількох технічних рішень, що задовольняють параметрам забруднюючої речовини та технічним умовам середовища проведення процесу, можливий вторинний вибір за економічними, конструктивними або екологічними характеристиками.

Зниження техногенного навантаження на довкілля від викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини та збереження якості атмосферного повітря неможливе без впровадження природоохоронних заходів, які передбачають застосування високоефективного газоочисного обладнання. В роботі детально розглянуто конструкції і особливості роботи високоефективного пилогазоочисного обладнання з регулярною пульсаційною насадкою (РПН). Описано фізичну та математичну модель взаємодії пилогазового потоку з парорідинною сумішшю – конденсаційний механізм укрупнення аерозольних часток в апараті. Проведено дослідження механізму утворення і математичний опис вихрового потоку під час проходження циліндричних елементів, які реалізують коагуляційний механізм зростання аерозольних частинок в апараті з РПН. Укрупнення аерозольних частинок у першій зоні апарату відбувається за рахунок механізму конденсаційного зростання, а також турбулентної та броунівської коагуляції. В результаті розрахунків отримано рівняння для визначення радіусу частинки в процесі конденсації парогазорідинної системи, що дозволяє визначити подальшу можливість уловлювання частинок за рахунок інерційного або турбулентно-дифузійного механізму.

Вперше математично описано процес розподілу рівноважних крапель у прямоточному масообмінному апараті з регулярною пульсаційною насадкою.

Отримано рівняння для розрахунку діаметра крапель поглинаючої рідини внаслідок дроблення рідинних потоків турбулізуючими елементами насадки у верхній частині апарату, яке дозволяє говорити про розвинену поверхню контакту фаз за рахунок великої кількості елементів насадки, що генерують міжфазну поверхню. Проведено теоретичні і практичні дослідження поверхні контакту фаз, які дозволяють встановити, що визначальну роль має краплинна складова. Це підтверджується механізмом утворення краплинної структури і візуальними спостереженнями гідродинамічної картини на насадковому елементі в момент утворення крапель.

Проведено дослідження механізмів осадження дрібнодисперсних зважених речовин, здатних захоплюватися краплинами рідини в апараті з РПН, залежно від параметрів дисперсного складу частинок. Обґрунтовано вибір дифузійного та інерційного механізмів осадження частинок, як переважаючого в апаратах з РПН. Отримано залежності, які дозволяють розрахувати розмір мінімального ефективного діаметра дрібнодисперсних зважених частинок речовини, які захоплюються краплями рідини в апараті з РПН. Ефективний розмір зважених частинок становить не менше 0,3 мкм, що свідчить про можливість роботи з дрібнодисперсними аерозолями промислових викидів. Проведені дослідження дозволяють стверджувати про можливість використання апаратів з РПН для комплексної очистки пилогазових викидів промислових виробництв.

Практична значущість роботи підтверджена практичними рекомендаціями впровадження у виробництво двох типів апаратів з регулярною пульсаційною насадкою для комплексного очищення викидів виробництв та методології вибору пилогазоочисного обладнання. Математична модель прогнозування та розрахунку зони забруднення атмосферного повітря внаслідок викидів дрібнодисперсних зважених речовин прийнята до використання Державною екологічною інспекцією у Сумській області.

**Ключові слова:** пилогазоочисне обладнання, дрібнодисперсні зважені речовини, моделювання розсіювання, алгоритм вибору, техногенне навантаження, довкілля, екологічно безпечні технології.

### Список публікацій здобувача

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

#### Монографії та розділи в монографіях

1. Газоочистное оборудование для комплексной очистки газов / Л. Гурець, И. Козий, Д. Пляцук. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 64 с.

2. Козій І. С., Пляцук Л. Д. Розробка програмного алгоритму вибору природозахисного обладнання. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022* : Колективна монографія. Полтава – Львів: НУШ імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка» – Дніпро: Середняк Т. К. 2022. С. 313–325.

#### Статті у фахових наукових виданнях із переліку МОН України

3. Козій І. С., Гурець Л. Л. Дослідження пилових викидів виробництва двоокису титану. *Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки*. Суми, 2012. Вип. №4. С. 180–185.

4. Козій І. С., Гурець Л. Л., Будьоний О. П. Моделювання розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері від стаціонарних джерел забруднення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків, 2012. Вип. №66 (972). С. 114–118.

5. Козий И. С., Макаренко Н. А. Определение кадмия в почве урбанизированных территорий и его влияние на здоровье человека. *Вісник Кременчуцького державного університета імені М. Остроградського*. Кременчук, 2012. Вип. №5 (76). С. 123–125.

6. Козій І. С., Вінниченко Н. О. Аналіз забруднення приземного шару атмосфери пилом рослинного походження. *Екологічна безпека*. Кременчук, 2013. Вип. №2 (16). С. 44–47.

7. Козій І. С., Гурець Л. Л., Трунова І. О., Курбет Т. В. Аналіз гідродинамічних і пиловловлюючих характеристик апарату з провальними тарілками. *Вісник Житомирського державного технічного університету*. Житомир, 2013. Вип. №4 (67). С. 120–125.

8. Hurets L., Kozii I., Miakaieva H. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of engineering sciences*. Sumy (Ukraine), 2017. Vol. №4, Issue 2. P. G12–G16.

9. Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablieieva I., Kozii I., Balintova M. Sulfur Utilization in the Systems of Biological Wastewater Denitrification. *Journal of engineering sciences*. Sumy (Ukraine), 2018. Vol. №5, Issue 1. P. H7–H15.

10. Plyatsuk L., Chernysh Y., Roy I., Kozii I. Clarification of the Recent Scientific Approaches in Magnetic Water Treatment. *Journal of engineering sciences*. Sumy (Ukraine), 2019. Vol. №6, Issue 1. P. F12–F18.

11. Козій І. С., Пляцук Л. Д., Гурець Л. Л. Математичний опис гідродинаміки високоефективного пилогазоочисного апарату. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв, 2021. Вип. №1 (484). С. 111–116.

12. Козій І. С., Пляцук Л. Д., Гурець Л. Л., Трунова І. О. Врахування параметрів аерозольних викидів під час розробки технологічних рішень зменшення впливу на довкілля. *Техногенно-екологічна безпека*. Харків, 2021. Вип. №1 (9). С. 3–10.

13. Козій І. С., Рой І. О., Яхненко О. М., Пономаренко Р. В., Щербак С. С. Математично-статистичне дослідження впливу дрібнодисперсних твердих забруднюючих речовин на здоров'я людини. *Техногенно-екологічна безпека*. Харків, 2021. Вип. №2 (10). С. 23–27.

14. Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L., Volnenko A. A. Capturing Aerosol Particles in a Device with a Regular Pulsating Nozzle. *Journal of engineering sciences*. Sumy (Ukraine), 2021. Vol. №8, Issue 2. P. F1–F5.

15. Козій І. С., Жиленко Т. І., Трунова І. О., Батальцев Є. В., Макаренко Н. О. Критерії вибору природозахисного обладнання для очищення промислових викидів підприємств. *Екологічні науки*. Київ, 2021. Вип. №6 (39). С. 12–18.

16. Kozii I. Investigation of the influence of finely dispersed solid substances of the atmospheric air on humans. *Environmental problems*. Lviv (Ukraine), 2022. Vol. 7, No. 1. P. 7–13.

17. Козій І. С. Системний підхід до вибору природозахисного обладнання. *Техногенно-екологічна безпека*. Харків, 2022. Вип. №1 (11). С. 48–54.

18. Козій І. С., Пляцук Л. Д. Дослідження гідродинаміки високоефективного пилогазоочисного обладнання з регулярною пульсаційною насадкою. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. Івано-Франківськ, 2022. Вип. №1(25). С. 81–89.

**Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та  
виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та  
Web of Science**

19. Plyatsuk L., Hurets L., Kozii I., Vaskin R. Industrial research studies of gas treatment device with a large hole sieve trays. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. №3. С. 95–100. (**Scopus, Q3**).

20. Roy I., Vaskina I., Vaskin R., Kozii I. Influence of the Magnetic Field Gradient on the Efficiency of Magnetic Water Treatment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. Cham: Springer, 2020. – Vol. 2. P. 387-395. (**Scopus, WoS**).



21. Zhylenko T., Kozii I., Shuda I., Bozhenko V. Using a web application to realize the effect of AR in assessing the environmental impact of emissions source. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. P. 193–204. **(Scopus)**.

22. Kozii I., Plyatsuk L., Hurets L. Distribution of the Dispersed Phase in the Gas Cleaning Equipment with Pulsating Plug. *Problemele Energeticii Regionale*. 2021. Vol. №1 (49). P. 29–38. **(Scopus, WoS, Q4)**.

23. Chernysh Y., Chubur V., Fukui M., Kozii I., Roy I. Stimulation of Anaerobic Fermentation of Wastewater and Sewage Sludge. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. Cham: Springer, 2021. P. 319–328. **(Scopus, WoS)**.

24. Kozii I., Plyatsuk L., Koval V. Algorithm for Selection Equipment to Reduce the Technogenic Effect on the Environment. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. №1 (53). P. 58–66. **(Scopus, WoS, Q4)**.

25. Kozii I., Plyatsuk L., Zhylenko T., Hurets L., Bataltsev Y., Sayenkov D. Development of the Turbulent Diffusion Model of Fine Suspended Substances in the Lower Atmosphere Layer. *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*. 2022. Vol. 28, No. 4. P. 529–535. **(Scopus, WoS, Q3)**.

### ***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

26. Дослідження забруднення приземного шару атмосфери пилом рослинного походження / І. С. Козій, Н. О. Вінниченко. *Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 23–26 квітня 2013 р. Суми: СумДУ, 2013. С. 203.

27. Моніторинг стану земельних ресурсів м. Суми / І. С. Козій, Д. В. Сапченко. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи роз-витку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії»*. 30–31 січня 2015 р. Переяслав-Хмельницький, 2015. С. 32–35.

28. Вимога сучасності – теплові насоси як елемент енерго- і ресурсозбереження / І. С. Козій, К. В. Лего. *Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 14–17 квітня 2015 р. Суми: СумДУ, 2015. С. 132–133.

29. Зниження техногенного навантаження на атмосферу підприємств хімічної промисловості / І. С. Козій, К. В. Лего. *Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 18–21 квітня 2017 р. Суми: СумДУ, 2017. С. 126.

30. Пилові викиди та їх вплив на здоров'я людини / І. С. Козій, К. В. Петроченко. *Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 18–21 квітня 2017 р. Суми: СумДУ, 2017. С. 130.

31. Сучасні шляхи поводження з твердими побутовими відходами / І. С. Козій, В. П. Яценко. *Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 16–19 квітня 2019 р. Суми: СумДУ, 2019. С. 226.

32. Зниження техногенного навантаження на довкілля підприємств харчової промисловості / І. С. Козій, П. В. Федоришин. *Матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 21–24 квітня 2020 р. Суми: СумДУ, 2020. С. 189–190.

33. Using a highly efficient gas cleaning equipment for reduction technogenic impact on the environment / І. С. Козій. *XXI Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки»*. 5–9 квітня 2021 р. Київ: НАУ, 2021. С. 125.

34. Вплив аерозольних викидів на довкілля / І. С. Козій, А. Ю. Вихрова. *Матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 20–23 квітня 2021 р. Суми: СумДУ, 2021. С. 189–190.

35. Технологічні рішення уловлювання викидів енергетичних підприємств / І. С. Козій. *I Міжнародна науково-теоретична конференція «Formation of innovative potential of world science»*. 07 травня 2021 р. Тель-Авів, ISR, 2021. С. 145–147.

36. Mathematical and statistical study of the influence of air pollutants on human / I. Roy, I. Kozii. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference* (Oxford, May 28, 2021). Oxford-Vinnitsia: P.C. Publishing House & European Scientific Platform. Vol. 1. P. 191–194.

37. Stimulation of Anaerobic Fermentation of Wastewater and Sewage Sludge / Y. Chernysh, V. Chubur, M. Fukui, I. Roy, I. Kozii. *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: Book of Abstracts of the 4th International Conference* (Lviv, June 8-11, 2021). Sumy: IATDI, 2021. P. 150.

38. Розробка моделі розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері / І. С. Козій. *Матеріали IX Міжнародної наукової конференції молодих вчених: Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування*. 25–26 листопада 2021 р. Харків: ХНУ ім. Каразіна, 2021. – С. 81–83.

39. Розробка моделі синтезу обґрунтованого вибору природоохоронного обладнання / І. С. Козій, Т. І. Жиленко. *Матеріали IX Всеукраїнської науково-технічної конференції. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 19–22 квітня 2022 р. Суми: СумДУ, 2022. С. 136–137.

40. Математичне обґрунтування вибору ефективних технологічних рішень для зменшення впливу на довкілля / І. С. Козій. *Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Подолання екологічних*

*ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022».* 26–27 травня 2022 р. Полтава – Львів. Полтава: НУПП, 2022. С. 302–304.

41. Опис конструкцій високоефективного обладнання з регулярною пульсаційною насадкою / І. С. Козій. *Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку».* 07 липня 2022 р. Любляна (Словенія): ГО «ВАДНД», 2022. С. 467–472.

42. Системний аналіз для зниження техногенного навантаження на довкілля пилових викидів і забезпечення цілей сталого розвитку / І. С. Козій. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Сталий розвиток країни в рамках європейської інтеграції».* 30 листопада 2022 р. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2022. С. 57.

***Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації***

43. Локальні моделі прогнозування стану екологічного простору: навчальний посібник / О. О. Рибалов, С. В. Сидоренко, І. С. Козій. Суми: Сумський державний університет, 2012. 154 с.

44. Спеціальне обладнання та процеси неорганічної хімії : підручник / за ред. Л. Д. Пляцука, І. С. Козія. Суми : Університетська книга, 2022. 390 с.

## ABSTRACT

***Kozii I. S. Scientific foundations of the system approach to reducing the man-made load from industrial emissions on the environment.*** – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree the Doctor of Technical Sciences (Doctor of Sciences) according to the specialty 21.06.01 – Environmental safety. – Sumy State University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2023.

The dissertation will be defended at a meeting of the specialized academic council D 55.051.04. Sumy State University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2023.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and theoretical problem of reducing the level of technogenic load on the environment from industrial emissions of the chemical industry, heat energy and engineering enterprises, in particular in industrially developed regions. It is accompanied by a complex negative impact on all constituent natural components, especially during emergencies and salvo emissions at production facilities and other situations that cause a violation of the ecological balance of the environment.

The dissertation was carried out within the framework of integration into the European Union - implementation of Directive 2010/75/EU on industrial emissions. To achieve the reform of Ukrainian legislation, a comprehensive analysis and development of methodological recommendations for eliminating the lag European standards, increasing the environmental awareness of the population, and involving the public in the processes of solving environmental problems were carried out in the dissertation.

It has been developed the scientific and methodological foundations of a systematic approach to reducing the impact of man-made emissions of production on the environment and ecologically oriented approaches to complex technological solutions to reduce their level of impact. It allows to ensure a reduction of the man-

made load on the environment from fine-dispersed suspended and sticky substances of different physico-chemical composition.

It has been improved the methodological basis of the system approach to solving the problem of man-made load from industrial emissions on the environment and scientific and practical approaches to the creation of algorithms for the justified selection of dust and gas cleaning equipment, taking into account the physical and chemical properties of pollutants, parameters of environmental protection equipment and environmental conditions of the process using information databases.

One of the main methods of ensuring a safe ecological state of the environment is the prevention of pollution by forecasting and using the necessary environmental protection measures. Air pollution levels for six main pollutants, including PM<sub>2.5</sub>, were studied throughout the territory of Ukraine, in the largest Ukrainian cities and in developed regions industry.

Solving the problem of atmospheric air pollution caused by dust and gas emissions from industry requires a comprehensive approach and cooperation between various parties, including enterprises, local authorities, and the public. Recommendations are offered for the prompt resolution of air pollution in Ukraine:

1. Conducting an environmental impact assessment of industrial enterprises: Conduct a detailed assessment of the impact of technological processes on the environment, considering the number of emissions, composition, and toxicity of substances released into the atmosphere. This will help determine the most problematic areas and the complexity of the problem.

2. Use systems for forecasting and assessing potential negative consequences from the release of pollutants into the surface layer of the atmosphere.

3. Use of effective dust and gas cleaning equipment: installation of modern filtration systems and complex emission cleaning can reduce harmful emissions and improve atmospheric air quality for the population and the environment.

4. Use of energy-efficient technologies: using energy-efficient technologies can reduce emissions into the atmosphere and lower electricity costs by reducing fuel consumption.

5. Cooperation with the public: cooperation with the local public, environmental organizations, and government bodies can help solve atmospheric air pollution problems. This can include informing residents about pollution risks, conducting regular emissions audits of businesses, and joint initiatives to improve air quality.

It has been established that the patterns of environmental hazard formation and the features of its manifestations should serve as a basis for the development of an environmental safety management system. One of the main methods of ensuring a safe ecological state of the environment is the prevention of pollution by forecasting and using the necessary environmental protection measures.

The study investigates the impact of emissions of fine particulate matter on human health and establishes a correlation between the volume of emissions and the incidence of cardiovascular diseases in Ukraine. Comparative analysis of the results obtained shows that the incidence of cardiovascular diseases in humans is largely caused by emissions of solid particles with a size of up to 2.5 micrometers.

Measures to reduce the anthropogenic impact of PM<sub>2.5</sub> emissions can be presented through technical and instrumental means, prediction of the spread of emissions, and implementation of public control through informing the public at various levels. Developing and implementing models for the spread of pollutants in the atmosphere is an important task on the way to European integration of the legislative and regulatory framework of Ukraine in accordance with Directive 2010/75/EU on Industrial Emissions.

The prerequisite for building a mathematical model of dispersion of finely dispersed suspended substances was the solution of the following tasks:

- the research aims to address the issue of uncertainty in the input data of a parameterized mathematical model for the transport of pollutants in the atmosphere;
- the study involves obtaining analytical solutions and developing corresponding numerical algorithms for simulating the dispersion of pollutants, including iterative and recursive computational algorithms;

– additionally, algorithms and software implementation for the dispersion model are developed to facilitate predicting levels of ground-level pollution caused by fine particulate matter.

The starting equation for the development the model was the three-dimensional equation for the propagation of impurities in a turbulent environment. According to the method of coordinate splitting, the solution of the problem was divided into three parts for different moments of time, and then the conditions of parameterization, normalization of parameters and functions, and normalization of initial and boundary conditions were fulfilled.

The inclusion in the general scheme of algorithms of approximation procedures on a given interval of output functions made it possible to obtain a mathematical model in the algorithm. After normalizing the initial and boundary conditions, normalized parameters, an equation was obtained, which is a function of the distribution of impurities in the surface layer of the atmosphere based on the equation for the distribution of impurities in a turbulent environment. Based on this function, a complete second-order central orthogonal composite plan was implemented. For the further possibility of comparing the values of concentration, speed and temperature, the input variables were normalized according to the formulas of the sample mean value. It was calculated to assess the accuracy of the obtained model, the sums of squares of the deviations of the experimental values of the initial variables from the calculated values.

The adequacy of the mathematical dispersion model was checked by the Fisher test, and the significance of the model coefficients was evaluated based on the Student distribution. The software algorithm for calculating the dispersion model of fine-dispersed pollutants requires modern computer software that is available to most users. The calculation takes 30–40 minutes for each new initial condition, which is an advantage of the proposed model. The verification of the adequacy of the mathematical model based on graphic visualization of the calculations indicates the effectiveness of the adopted model, which meets the conditions of the current



legislation, taking into account the various initial parameters of the emission sources and the requirements of the distribution of impurities.

To simplify the possibilities of using the developed model for a wide range of the public was created a web application to estimate the distribution distance of fine-dispersed pollutants from the source of their emissions. The web application can be used in monitoring systems to inform and control emissions of industrial enterprises at various levels.

It was developed a scientific-methodological approach to research and argumentation for the introduction of optimal technologies for reducing emissions of fine suspended solids in production, which made it possible to increase the level of environmental safety of the relevant territories.

The need to develop software solutions for the selection of optimal technological solutions for cleaning emissions for the protection and preservation of the environment are key goals of sustainable development of society. In the work, it was carried out an analysis of databases of parameters of polluting substances, conditions of emission cleaning process and parameters of dust and gas cleaning equipment. The study of the above-mentioned databases allows implementing justified directions for the selection of environmental protection equipment by using a mathematical and software system approach.

Using the method of graphs, a systematic approach to the selection of dust and gas cleaning equipment was developed and it was obtained a quick algorithmic explanation of the oriented optimal selection of certain types of cleaning equipment. The proposed method takes into account various physical features of equipment operation and allows choosing the most effective technological environmental protection solutions in accordance with the amount of emissions and environmental conditions.

The parameterized optimization was carried out in the form of a directed selection graph of the vacuum cleaner, which is implemented by  $n$  number of methods. The proposed model makes it possible to build a method adjacency matrix, which has the dimension  $m \times n$  according to the number of analyzed methods and the

complexity of solving the problem. According to the adjacency matrices, it was built a network model of equipment selection. Directed selection of equipment consists of in determining the shortest path of this network model. The optimization problem is solved by the method of linear programming. For all existing options for solving the problem, the process quality criteria must be in the range of permissible values, both for the range of the number of emissions, the power of the device, the ability to work efficiently, and limitations for the conditions of the process environment. The optimal option is the technological equipment for cleaning the emissions of certain pollutants substances, which meets the criteria for the minimum selection of dust and gas cleaning equipment with the highest efficiency of catching admixtures of polluting substances. It was obtained a block diagram of the conditions for the selection of technological equipment, taking into account successive hierarchical comparisons of clusters of elements.

The methodology for selecting technical solutions for reducing emissions of pollutants in the heat energy and chemical industry in the software environment of the Google Tables service has been proposed and implemented. The use of the Google Tables service simplifies the use of the equipment selection method and makes it available to a wide number of users on computers that support files in \*.xlsx format or online mode.

The software algorithm is based on the method of sequential hierarchical clustering and comparison of parameters of three databases: characteristics of pollutants, technological conditions of the environment and parameters of dust and gas cleaning equipment. The sequential comparison of the characteristics (clusters) of the databases allows obtaining the optimal value of the characteristics the technological solution, taking into account the characteristics the pollutant and the environmental conditions of this process. For the purpose of sequential comparison of clusters of three databases, formal conditions EQUAL, GREATER, LESS, WILL BE EQUAL, built-in logical commands TRUE or FALSE and truth tables of parameter matching conditions were used.

The software algorithm for the selection of technical solutions is characterized by the convenience and speed of operation, the possibility of adding databases of pollutants and technological equipment. In the case of choosing from the equipment database several technical solutions that satisfy the parameters of the pollutant and the technical conditions of the process environment, a secondary selection is possible based on material and technical or environmental characteristics of the equipment.

Reducing the technogenic load on the environment from emissions that contain fine suspended substances and preserving the quality of atmospheric air is impossible without implementing environmental protection measures, including using highly efficient gas-cleaning equipment. The work examines in detail the design and features of the highly efficient dust and gas cleaning equipment with a regular pulsating nozzle (RPN). The physical and mathematical picture of the interaction of the dust-gas flow with the vapor-liquid mixture is described - the condensation mechanism of aerosol particles thickening in the apparatus. It was carried out the study of the mechanism of formation and mathematical description of the vortex flow during the passage of cylindrical elements, which implement the coagulation mechanism of the growth of aerosol particles in the apparatus with tap-changer. Consolidation of aerosol particles in the first zone of the apparatus occurs due to the mechanism of condensation growth, as well as turbulent and Brownian coagulation. As a result of the calculations, an equation was obtained for determining the radius of a particle in the process of condensation of a vapor-gas-liquid system, which makes it possible to determine the further possibility of catching particles due to the inertial or turbulent-diffusion mechanism.

For the first time, the process of distribution of equilibrium drops in a direct-flow mass transfer apparatus with a regular pulsation nozzle is mathematically described. An equation was obtained for calculating the diameter of the drops of the absorbing liquid as a result of the crushing of liquid flows by the turbulating elements of the nozzle in the upper part of the apparatus, which allows us to talk

about the developed contact surface of the phases due to the large number of nozzle elements that generate the interphase surface.

The study of the contact surface of the phases was carried out, which made it possible to establish that the droplet component plays a decisive role. This is confirmed by the mechanism of droplet structure formation and visual observations of the hydrodynamic pattern on the nozzle element at the time of droplet formation.

The study of various mechanisms of deposition of finely dispersed suspended substances, capable of being captured by liquid droplets in the apparatus with a tap-changer, was carried out, depending on the parameters of the granulometric composition of the particles. It is substantiated the choice of diffusion and inertial particle deposition mechanisms, as the predominant ones in tap-changer devices. Calculations have been made that allow us to obtain the size of the minimum effective diameter of aerosol particles that are captured by liquid drops in the apparatus with tap-changer. The effective size of suspended particles is at least 0.3  $\mu\text{m}$ , which indicates the possibility of working with fine aerosols of industrial emissions. The conducted studies allow us to assert the possibility of using tap-changer devices for comprehensive cleaning of dust and gas emissions from industrial productions.

The practical significance of the work is confirmed by the practical recommendations for the introduction into production of two types of devices with a regular pulsation nozzle for the complex cleaning of industrial emissions and the methodology for selecting dust and gas cleaning equipment. The mathematical model of forecasting and calculation of the zone of atmospheric air pollution due to emissions of finely dispersed suspended substances has been accepted for use by the State Environmental Inspection in Sumy region.

**Keywords:** dust and gas cleaning equipment, fine suspended substances, dispersion modeling, selection algorithm, man-made load, environment, ecologically safe technologies.

## List of publications

*Scientific works, in which the main scientific results of the dissertation are published*

### Monographs

1. Gas cleaning equipment for complex gas cleaning / L. Hurets, I. Kozii, D. Plyatsuk. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 64 p.

2. Kozii I. S., Plyatsuk L. D. Development of a software algorithm for the selection of environmental protection equipment. *Overcoming environmental risks and threats to the environment in emergency situations – 2022* : Collective monograph. Poltava – Lviv: Yury Kondratyuk NUPP, Lviv Polytechnic University – Dnipro: Serednyak T. K. 2022. P. 313–325.

### Articles in professional scientific publications from the list of the Ministry of Education and Science of Ukraine

3. Kozii I. S., Hurets L. L. Study of dust emissions from titanium dioxide production. *Bulletin of Sumy State University. Series: Technical sciences*. Sumy, 2012. Vol. №4. P. 180–185.

4. Kozii I. S., Hurets L. L., Budyonuy A. P. Modeling of dispersion of fine dust in the atmosphere from stationary sources of pollution. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific papers. Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv, 2012. Vol. №66 (972). P. 114–118.

5. Kozii I. S., Makarenko N. A. Determination of cadmium in the soil of urban areas and its impact on human health. *Bulletin of the Kremenchug State University named after M. Ostrogradskyi*. Kremenchuk, 2012. Vol. №5 (76). P. 123–125.

6. Kozii I. S., Vinnychenko N. A. Analysis of pollution of the surface layer of the atmosphere by dust of plant origin. *Ecological safety*. Kremenchuk, 2013. Vol. №2 (16). P. 44–47.

7. Kozii I. S., Hurets L. L., Trunova I. A., Kurbet T. V. Analysis of hydrodynamic and dust-catching characteristics of the apparatus with falling plates.

*Bulletin of the Zhytomyr State Technical University*. Zhytomyr, 2013. Vol. №4 (67). P. 120–125.

8. Hurets L., Kozii I., Miakaieva H. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of engineering sciences*. Sumy, 2017. Vol. №4, Issue 2. P. G12–G16.

9. Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablieieva I., Kozii I., Balintova M. Sulfur Utilization in the Systems of Biological Wastewater Denitrification. *Journal of engineering sciences*. Sumy, 2018. Vol. №5, Issue 1. P. H7–H15.

10. Plyatsuk L., Chernysh Y., Roy I., Kozii I. Clarification of the Recent Scientific Approaches in Magnetic Water Treatment. *Journal of engineering sciences*. Sumy, 2019. Vol. №6, Issue 1. P. F12–F18.

11. Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L. Mathematical description of the hydrodynamics of a highly efficient dust and gas cleaning device. *Collection of scientific works of the Admiral Makarov National Shipbuilding University*. Mykolayiv, 2021. Vol. №1 (484). P. 111–116.

12. Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L., Trunova I. A. Consideration of parameters of aerosol emissions during the development of technological solutions for reducing the impact on the environment. *Technological and environmental safety*. Kharkiv, 2021. Vol. №1 (9). P. 3–10.

13. Kozii I. S., Roy I. A., Yakhnenko E. N., Ponomarenko R. V., Scherbak S. S. Mathematical and statistical study of the impact of finely dispersed solid pollutants on human health. *Technological and environmental safety*. Kharkiv, 2021. Vol. №2 (10). P. 23–27.

14. Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L., Volnenko A. A. Capturing Aerosol Particles in a Device with a Regular Pulsating Nozzle. *Journal of engineering sciences*. Sumy, 2021. Vol. №8, Issue 2. P. F1–F5.

15. Kozii I. S., Zhylenko T. I., Trunova I. A., Bataltsev E. V., Makarenko N. A. Criteria for choosing environmental protection equipment for cleaning industrial emissions of enterprises. *Environmental sciences*. Kyiv, 2021. Vol. №6 (39). P. 12–18.

16. Kozii I. Investigation of the influence of finely dispersed solid substances of the atmospheric air on humans. *Environmental problems*. Lviv, 2022. Vol. 7, No. 1. P. 7–13.

17. Kozii I. S. A systematic approach to the selection of environmental protection equipment. *Technological and environmental safety*. Kharkiv, 2022. Vol. №1 (11). P. 48–54.

18. Kozii I. S., Plyatsuk L. D. Study of the hydrodynamics of highly efficient dust and gas cleaning equipment with a regular pulsation nozzle. *Environmental safety and balanced use of resources*. Ivano-Frankivsk, 2022. Vol. №1(25). P. 81–89.

#### **Articles in scientific periodicals of other states and publications, which are indexed by databases of Scopus and Web of Science**

19. Plyatsuk L., Hurets L., Kozii I., Vaskin R. Industrial research studies of gas treatment device with a large hole sieve trays. *Scientific Bulletin of the National Mining University*. Dnipropetrovsk, 2016. Vol. №3. P. 95–100. **(Scopus, Q3)**

20. Roy I., Vaskina I., Vaskin R., Kozii I. Influence of the Magnetic Field Gradient on the Efficiency of Magnetic Water Treatment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. Cham: Springer, 2020. – Vol. 2. P. 387-395. **(Scopus, WoS)**

21. Zhylenko T., Kozii I., Shuda I., Bozhenko V. Using a web application to realize the effect of AR in assessing the environmental impact of emissions source. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. P. 193–204. **(Scopus)**

22. Kozii I., Plyatsuk L., Hurets L. Distribution of the Dispersed Phase in the Gas Cleaning Equipment with Pulsating Plug. *Problemele Energeticii Regionale*. 2021. Vol. №1 (49). P. 29–38. **(Scopus, WoS, Q4)**

23. Chernysh Y., Chubur V., Fukui M., Kozii I., Roy I. Stimulation of Anaerobic Fermentation of Wastewater and Sewage Sludge. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. Cham: Springer, 2021. P. 319–328. **(Scopus, WoS)**

24. Kozii I., Plyatsuk L., Koval V. Algorithm for Selection Equipment to Reduce the Technogenic Effect on the Environment. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. №1 (53). P. 58–66. **(Scopus, WoS, Q4)**

25. Kozii I., Plyatsuk L., Zhylenko T., Hurets L., Bataltsev Y., Sayenkov D. Development of the Turbulent Diffusion Model of Fine Suspended Substances in the Lower Atmosphere Layer. *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*. 2022. Vol. 28, No. 4. P. 529–535. **(Scopus, WoS, Q3)**

***Scientific works, testifying the approbation of dissertation materials***

26. Research on pollution of the surface layer of the atmosphere by dust of plant origin / I. S. Kozii, N. A. Vinnychenko. *Materials of the scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of the faculty of technical systems and energy-efficient technologies. Modern technologies in industrial production*. April 23-26, 2013. Sumy: Sumy State University, 2013. P. 203.

27. Monitoring the state of land resources in the city of Sumy / I. S. Kozii, D. V. Sapchenko. *Materials of X International Scientific and Practical Internet Conference "Problems and Prospects of the Development of Science at the Beginning of the Third Millennium in the Countries of Europe and Asia"*. January 30-31, 2015. Pereyaslav-Khmelnyskyi, 2015. P. 32–35.

28. The requirement of modernity - heat pumps as an element of energy and resource saving / I. S. Kozii, K. V. Lego. *Materials of the scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of the faculty of technical systems and energy-efficient technologies. Modern technologies in industrial production*. April 14–17, 2015. Sumy: Sumy State University, 2015. P. 132–133.

29. Reduction of man-made load on the atmosphere of chemical industry enterprises / I. S. Kozii, K. V. Lego. *Materials of the scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of the faculty of technical systems and energy-efficient technologies. Modern technologies in*



*industrial production*. April 18–21, 2017. Sumy: Sumy State University, 2017. P. 126.

30. Dust emissions and their impact on human health / I. S. Kozii, K. V. Petrochenko. *Materials of the scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of the faculty of technical systems and energy-efficient technologies. Modern technologies in industrial production*. April 18–21, 2017. Sumy: Sumy State University, 2017. P. 130.

31. Modern ways of handling solid household waste / I. S. Kozii, V. P. Yatsenko. *Materials of the VI All-Ukrainian Scientific and Technical Conference. Modern technologies in industrial production*. April 16–19, 2019. Sumy: Sumy State University, 2019. P. 226.

32. Reduction of man-made load on the environment of food industry enterprises / I. S. Kozii, P. V. Fedoryshyn. *Materials of the VII All-Ukrainian Scientific and Technical Conference. Modern technologies in industrial production*. April 21–24, 2020. Sumy: Sumy State University, 2020. P. 189–190.

33. Using a highly efficient gas cleaning equipment for reduction technogenic impact on the environment / I. S. Kozii. *XXI International Scientific and Practical Conference of Higher Education Graduates and Young Scientists "Aviation. Modern problems of science"*. April 5–9, 2021. Kyiv: NAU, 2021. P. 125.

34. Impact of aerosol emissions on the environment / I. S. Kozii, A. Yu. Vykhrova. *Materials of the VIII All-Ukrainian Scientific and Technical Conference. Modern technologies in industrial production*. April 20–23, 2021. Sumy: Sumy State University, 2021. P. 189–190.

35. Technological solutions for catching emissions of energy enterprises / I. S. Koziiy. *I International Scientific and Theoretical Conference «Formation of innovative potential of world science»*. May 7, 2021. Tel Aviv, ISR, 2021. P. 145–147.

36. Mathematical and statistical study of the influence of air pollutants on human / I. Roy, I. Kozii. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the II*

*International Scientific and Practical Conference* (Oxford, May 28, 2021). Oxford-Vinnitsia: P.C. Publishing House & European Scientific Platform. Vol. 1. P. 191–194.

37. Stimulation of Anaerobic Fermentation of Wastewater and Sewage Sludge / Y. Chernysh, V. Chubur, M. Fukui, I. Roy, I. Kozii. *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: Book of Abstracts of the 4th International Conference* (Lviv, June 8-11, 2021). Sumy: IATDI, 2021. P. 150.

38. Development of a model of dispersion of pollutants in the atmosphere / I. S. Kozii. *Materials of the IX International Scientific Conference of Young Scientists: Ecology, Neoecology, Environmental Protection and Balanced Nature Management*. November 25-26, 2021. Kharkiv: KhNU named after Karazin, 2021. – P. 81–83.

39. Development of a synthesis model of a justified choice of environmental protection equipment / I. S. Kozii, T. I. Zhylenko. *Materials of the IX All-Ukrainian Scientific and Technical Conference. Modern technologies in industrial production*. April 19–22, 2022. Sumy: Sumy State University, 2022. P. 136–137.

40. Mathematical justification of the choice of effective technological solutions to reduce the impact on the environment / I. S. Kozii. *Materials of the 1st International scientific and practical conference "Overcoming ecological risks and threats to the environment in emergency situations - 2022"*. May 26-27, 2022. Poltava - Lviv. Poltava: NUPP, 2022. P. 302–304.

41. Description of constructions of highly efficient equipment with a regular pulsation nozzle / I. S. Kozii. *Materials of the XXII International Scientific and Practical Conference "Modern Aspects of Science Modernization: Status, Problems, Development Trends"*. July 7, 2022. Ljubljana (Slovenia): GO "VADND", 2022. P. 467–472.

42. System analysis to reduce the man-made load on the environment of dust emissions and ensure the goals of sustainable development / I. S. Kozii. *Materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists "Sustainable development of the country within the*

*framework of European integration".* November 30, 2022. Zhytomyr: State University "Zhytomyr Polytechnic", 2022. P. 57.

***Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation***

43. Local models of forecasting the state of the ecological space: a study guide / A. A. Rybalov, S. V. Sidorenko, I. S. Kozii. Sumy: Sumy State University, 2012. 154 p.

44. Special equipment and processes of inorganic chemistry : textbook / edited by L. D. Plyatsuka, I. S. Kozii. Sumy : University book, 2022. 390 p.

## ЗМІСТ

С.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	36
ВСТУП.....	38
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
ТЕХНОГЕННЕ НАВАНТАЖЕННЯ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ВІД НАДХОДЖЕННЯ В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ВИКИДІВ, ЩО МІСТЯТЬ ДРІБНОДИСПЕРСНІ ЗВАЖЕНІ РЕЧОВИНИ.....	48
1.1 Дослідження питання викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини.....	48
1.2 Аналіз викидів і утворення дрібнодисперсних домішок в атмосфері....	51
1.3 Аналіз відповідності українського законодавства вимогам Європейського союзу щодо охорони атмосферного повітря.....	55
1.4 Екологічна безпека техногенно навантаженого регіону.....	62
1.5 Аерозолі, особливості утворення, класифікація аерозолів.....	70
1.5.1 Контроль вмісту аерозолів в приземному шарі атмосфери.....	70
1.5.2 Класифікація аерозолів.....	74
1.6 Вплив аерозольних викидів на середовище життєдіяльності людини....	84
1.7 Моделювання поширення домішок в атмосфері.....	92
1.8 Технологічне обладнання для очистки газових викидів від дрібнодисперсних зважених речовин.....	106
1.8.1 Методи інтенсифікації процесів коагуляції і осадження дрібнодисперсних зважених речовин.....	109
1.8.2 Ефективність осадження аерозолів в апаратах з регулярною пульсаційною насадкою.....	111
1.9 Постановка задач дослідження.....	117

## РОЗДІЛ 2

## МЕТОДИ Й МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ОБ'ЄКТУ

ДОСЛІДЖЕННЯ.....	119
2.1 Системний аналіз для вирішення поставлених задач дослідження.....	119
2.2 Методика дослідження впливу дрібнодисперсних зважених речовин на здоров'я людини.....	124
2.3 Об'єкт дослідження.....	126
2.4 Побудова алгоритмів вибору обладнання.....	130
2.5 Загальна методика проведення досліджень.....	133
2.5.1 Опис експериментальної установки.....	134
2.5.2 Методика дослідження гідродинамічних характеристик апаратів...	137
2.5.3 Методика дослідження пилоочищення.....	139
2.5.4 Методика відбору проб пилу в СЗЗ.....	141
2.5.5 Методика проведення мікроскопічних досліджень пилу.....	142
2.5.6 Методика обробки результатів експериментальних досліджень.	
Оцінка впливу похибок замірів на результати досліджень.....	142
2.6 Висновки та узагальнення до розділу 2.....	145

## РОЗДІЛ 3

## СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

## ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ

ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ЗВАЖЕНИХ РЕЧОВИН.....	147
3.1 Кореляційно-регресійний аналіз дослідження впливу дрібнодисперсного пилу на здоров'я людини.....	147
3.2 Моделювання розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин в приземному шарі атмосфери.....	152
3.2.1 Основи побудови чисельної математичної моделі.....	152
3.2.2 Визначення умов поширення домішок в атмосфері.....	160
3.2.3 Алгоритм моделі поширення забруднюючих речовин.....	163

3.2.4 Програмна реалізація моделі поширення домішок в приземному шарі атмосфери .....	167
3.2.5 Перевірка адекватності програмних результатів розрахунку моделі...	173
3.2.6 Практична реалізація моделі розсіювання забруднюючих речовин з використанням Web-платформи.....	177
3.7 Висновки та узагальнення до розділу 3.....	181

## РОЗДІЛ 4

### СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПИЛОГАЗООЧИСНОГО

ОБЛАДНАННЯ.....	184
-----------------	-----

4.1 Створення баз даних вихідних умов для вибору природозахисного обладнання.....	184
4.1.1 База даних забруднюючих речовин.....	186
4.1.2 База даних технологічних умов середовища.....	190
4.1.3 База даних пилогазоочисного обладнання.....	192
4.2 Вибір природозахисного обладнання з використанням графів.....	195
4.3 Параметризована оптимізація вибору обладнання.....	199
4.4 Розробка програмного алгоритму вибору обладнання.....	205
4.5 Висновки та узагальнення до розділу 4.....	211

## РОЗДІЛ 5

### ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВЛОВЛЕННЯ

ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ЗВАЖЕНИХ РЕЧОВИН.....	213
--	-----

5.1 Конструкції високоефективного обладнання з РПН.....	213
5.2 Гідродинамічні залежності і характеристики апаратів з організованими вихровими зонами.....	218
5.2.1 Ежекційний апарат з РПН.....	218
5.2.2 Форсунковий апарат з РПН.....	224
5.3 Розрахунок гідравлічного опору.....	227

5.4	Пиловловлення в апараті з РПН.....	232
5.5	Закономірності конденсаційного та коагуляційного механізму укрупнення аерозольних часток в апараті з РПН.....	237
5.6	Розподіл дисперсної фази в апараті з РПН.....	249
5.7	Ефективність уловлення дрібнодисперсних зважених речовин в апараті з РПН.....	258
5.8	Висновки та узагальнення до розділу 5.....	266
	ВИСНОВКИ.....	269
	СПИСОК ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ.....	273
	ДОДАТКИ.....	320

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

DALY – показник втрат років життя на 1000 осіб населення країни у зв'язку з хворобою, інвалідністю та передчасною смертю;

OECD – Організація економічного співробітництва та розвитку;

PM<sub>2,5</sub> – тверді частинки розміром від 10 нм до 2,5 мкм;

PM<sub>10</sub> – тверді частинки розміром від 2,5 мкм до 10 мкм;

X – сукупність параметрів забруднюючих речовин;

Y – сукупність параметрів умов технологічного середовища;

Z – сукупність параметрів пилогазоочисного обладнання;

АП – атмосферне повітря;

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров'я;

ВПО – вибір пилогазоочисного обладнання;

Г – газова фаза;

ГДК – гранично допустима концентрація;

ГДВ – гранично допустимий викид;

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

ДЗР – дрібнодисперсні зважені речовини;

ДСС – Державна служба статистики;

ЗР – забруднююча речовина;

КУР – кількість утримуваної рідини;

НПС – навколишнє природне середовище;

ОНД-86 – методика розрахунку концентрацій у атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств;

ПАТ – публічне акціонерне товариство;

ПК – послідовна ієрархічна кластеризація;

ПТВО – провальна тарілка великих отворів;

Р – рідка фаза;



РПН – регулярна пульсаційна насадка;

СЗЗ – санітарно-захисна зона;

Т – тверда фаза;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

ТЕС – теплова електростанція

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Екологічна складова національної безпеки України на сучасному етапі розвитку промисловості є важливим вектором внутрішньої й зовнішньої політики нашої держави. Україна обрала курс на інтеграцію в європейську спільноту, що потребує з боку держави виконання завдань щодо додержання певних екологічних стандартів безпеки і здійснення відповідальної екологічної політики з охорони навколишнього природного середовища та підвищення якості атмосферного повітря на рівні загальноприйнятих міжнародних нормативних документів. Відповідність вимогам природоохоронної діяльності європейських країн для нашої держави передбачає розроблення та впровадження нормативно-правових актів, нових методик аналізу довкілля, створення моніторингових систем, проведення науково-технічних досліджень і розробок природозахисного обладнання. Для цього підприємства, що забруднюють навколишнє природне середовище, повинні впроваджувати екологічно орієнтовані технології, сучасні методики прогнозування рівня впливу від забруднюючих речовин та високоефективне пилогазоочисне обладнання для очищення пилогазових викидів.

Пилогазові викиди промислових підприємств характеризуються багатокомпонентним складом, великими обсягами, можуть містити домішки як легкозлипливих, так і смолистих речовин, що знижує ефективність наявних систем пилоочищення. Особливе місце серед забруднювачів займає дрібнодисперсний пил, що поширюється на значну відстань від джерел забруднення, має фіброгенні властивості й становить значну екологічну небезпеку як для здоров'я людини, так і для довкілля.

Зниження техногенного навантаження від пилових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, передбачає використання комплексного підходу до проблем охорони довкілля та здоров'я населення. Методологічною основою запровадження системи оптимальних природозахисних

технологічних рішень для зниження техногенного навантаження від викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, на довкілля, оцінювання стану компонентів довкілля та вибору способів підвищення екологічної безпеки промислових виробництв є системний підхід, який доцільно використовувати як для вдосконалення системи «викиди виробництва – природозахисне обладнання – зменшення техногенного навантаження на довкілля», аналізування проблем, так і в процесі ухвалення управлінських рішень.

Дослідження і розроблення наукових основ системного підходу для зменшення негативного впливу викидів промислових підприємств, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, на довкілля обумовлюють актуальність роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку передумов для ефективного запобігання, зменшення й контролю промислового забруднення в Україні на 2019–2028 рр. згідно «Концепції реалізації державної політики у сфері промислового забруднення» і Національному плану дій з охорони навколишнього природного середовища на 2023–2025 рр. із заходу «Розроблення планів поліпшення якості атмосферного повітря для зон та агломерацій».

Робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету, пов'язаних із тематиками «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики» (номер державної реєстрації 0116U006606) згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України, в яких автор брав участь як виконавець.

У дисертаційній роботі використані результати досліджень, проведених під час виконання договору на розроблення та передавання науково-технічної продукції з теми: «Комплексні послуги у галузі екології для підприємств,

установ та організацій» (№ 51.16-2019.СП/107), у якій автор брав участь як відповідальний виконавець.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розроблення та вдосконалення наукових основ системного підходу до зниження техногенного навантаження від викидів промислових виробництв, що містять дрібнодисперсний пил, за допомогою комплексного розроблення методів прогнозування забруднень, методик вибору, створення й використання високоефективного пилогазоочисного обладнання.

**Завдання досліджень.** Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз факторів екологічної небезпеки від викидів промислових підприємств, які містять дрібнодисперсний пил ( $PM_{2,5}$ );

- провести аналіз законодавчої бази України на відповідність Європейському законодавству щодо охорони атмосферного повітря та встановлення необхідних напрямків діяльності на шляху до євроінтеграції промислового виробництва;

- з метою підвищення рівня екологічної безпеки населених пунктів установити залежність між забрудненням атмосферного повітря твердими частинками  $PM_{2,5}$  і показниками здоров'я населення та розробити математичну модель поширення дрібнодисперсних зважених речовин у приземному шарі атмосфери;

- розробити програмні застосунки для оцінки, контролю та інформування громадськості щодо техногенного впливу від промислових викидів дрібнодисперсного пилу  $PM_{2,5}$ ;

- розробити методики вибору високоефективного пилогазоочисного обладнання для зменшення техногенного навантаження від викидів дрібнодисперсного пилу промислових підприємств на довкілля;

- розробити конструкції пилоочисного обладнання з розвиненою поверхнею контакту фаз для вловлювання дрібнодисперсного пилу;

- провести теоретичне та експериментальне дослідження ефективності пиловловлювання в розроблених конструкціях пилогазоочисного обладнання;
- дослідити фактори впливу на ефективність пилоочищення в розроблених типах високоефективних пилогазоочисних апаратів.

**Об’єкт дослідження** – техногенний вплив промислових викидів, що містять дрібнодисперсний пил, на довкілля.

**Предмет дослідження** – системний підхід до зниження техногенного навантаження на компоненти довкілля від промислових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини.

**Методи дослідження.** Теоретичні аспекти дисертаційної роботи ґрунтуються на системному, фізичному та математичному моделюванні процесів впливу викидів промислових виробництв на довкілля. Застосовано методіку кореляційно-регресійного аналізу для дослідження впливу дрібнодисперсних зважених речовин на здоров’я людини. Використані аналітичні методи для дослідження процесів взаємодії пилогазового потоку з рідиною, розсіювання пилу в атмосфері, а також експериментальні методи дослідження ефективності роботи апарата. Під час проведення експериментальних досліджень були використані такі методи: аспіраційного відбору проб повітря, рентгеноскопії (растровий електронний мікроскоп Ремма-М), електронної мікроскопії та гравіметрії (дисківа центрифуга фракційного розподілу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78) для аналізування дрібнодисперсних зважених речовин.

Для моделювання розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин використане рівняння поширення домішок у турбулентному середовищі. Розв’язування рівняння виконане за допомогою методу покоординатного розщеплення та з використанням ітераційно-рекурсивного методу.

Використані методи оптимізації вибору природозахисного обладнання на підставі аналізування баз даних забруднюючих речовин, технологічних умов середовища та пилогазоочисного обладнання. Для побудови графів використано методіку UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection)

та параметризовану оптимізацію. Розроблення програмного алгоритму вибору обладнання реалізоване в середовищі Google-Таблиці за методом послідовної ієрархічної кластеризації (ПКК). Дані аналізували з використанням програмної системи аналізування даних Statistica, версія 13.0.0.0 (TIBCO Software Inc., 2017), PTC Mathcad Prime 7 (© PTC Inc. (PTC), 2021), ЕОЛ+ 5.3.8 (КБСП «Топаз», 2017), Google-Таблиці (Google Inc., 2021).

**Наукова новизна одержаних результатів.** Із метою підвищення рівня екологічної безпеки викидів промислових підприємств і зниження техногенного впливу від дрібнодисперсного пилу на основі виконаних теоретичних досліджень та експериментальних даних одержані такі нові наукові результати:

**вперше:**

– розроблено наукові основи системного підходу до зниження впливу промислових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини ( $PM_{2.5}$ ), із застосуванням оцінювання впливу викидів на довкілля й здоров'я людини, прогнозуванням забруднення довкілля, розробленням методик вибору природозахисного обладнання, дослідження і використання високоефективних конструкцій пилогазоочисного обладнання;

– розроблено математичну модель поширення дрібнодисперсних зважених речовин у приземному шарі атмосфери для оцінювання, прогнозування й зниження техногенного навантаження від викидів промислових підприємств;

– розроблено алгоритми та методики вибору пилогазоочисного обладнання з використанням теорії графів і методу послідовної ієрархічної кластеризації для аналізу вихідних баз даних;

– досліджено й математично описано процес розподілу і механізм утворення крапель у робочій зоні прямооточного масообмінного апарата з регулярною пульсаційною насадкою;

– одержано математичну залежність для розрахунку діаметра крапель поглинальної рідини, утворюваних унаслідок дроблення рідинних потоків

турбулізуючими елементами насадки в апараті з регулярною пульсаційною насадкою;

– одержано математичну залежність для розрахунку мінімального діаметра частинок дрібнодисперсних зважених речовин, що можуть бути захоплені краплями рідини в апараті з регулярною пульсаційною насадкою;

**набули подальшого розвитку:**

– наукові основи системно-поелементного підходу до процесу вловлювання дрібнодисперсних зважених речовин в апаратах із регулярною пульсаційною насадкою;

**вдосконалено:**

– науково-практичні підходи до створення методик обґрунтованого вибору природозахисного обладнання;

– опис математичної моделі взаємодії пилогазового потоку з парорідинною сумішшю у форсунковому типі апаратів із регулярною пульсаційною насадкою.

**Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблено програмне забезпечення для моделі прогнозування розсіювання забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери. Програмна реалізація алгоритму здійснена в середовищі PTC Mathcad Prime 7, а візуальна складова – як Web-додаток із використанням HTML-розмітки, CSS-стилів і мови програмування JavaScript. Програма для розрахунку розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин може використовуватися в системах моніторингу для оцінювання і контролю техногенного впливу промислових підприємств на довкілля та інформування громадськості на різних рівнях.

2. Розроблено програмне розв'язання алгоритму вибору природоохоронного обладнання, що враховує різні фізичні особливості роботи обладнання й параметри забруднюючих речовин і дозволяє відповідно до кількості викидів та врахування технологічних умов середовища обирати ефективні технологічні природоохоронні рішення для зменшення

техногенного впливу на довкілля. Програма доступна для широкого кола користувачів комп'ютерами з підтриманням файлів у форматі \*.xlsx або режимі онлайн, характеризується зручністю та швидкістю роботи, можливістю доповнення баз даних забруднюючих речовин і природоохоронного обладнання.

3. Розроблено конструкції пилогазоочисних апаратів із регулярною пульсаційною насадкою (РПН) (форсунковий та ежекційний тип), які поєднують у собі можливості створення в робочій зоні організованих вихрових зон і мають широкий діапазон стійкої роботи. Ефективність пиловловлення дрібнодисперсного пилу в досліджуваних типах апаратів із РПН становить понад 99 %, що свідчить про високу ефективність розроблених конструкцій обладнання.

4. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво двох типів високоефективних пилогазоочисних апаратів, які працюють у режимі розвиненої турбулентності для комплексного очищення викидів виробництва на базі ДУ «Ніохім» (акт впровадження від 20.07.2021 р.) та СП «Технополіс» (акт впровадження від 23.09.2022 р.), а також методологію вибору пилогазоочисного обладнання та порядок розрахунку ефективності роботи апаратів із РПН для очищення викидів від дрібнодисперсних зважених речовин на ПрАТ «Інститут «Сумипроєкт» (акт впровадження від 20.09.2022 р.).

5. Державна екологічна інспекція в Сумській області (акт впровадження від 10.04.2022 р.) впровадила в роботу рекомендації та математичну модель поширення забруднюючих речовин для прогнозування й розрахунку зони забруднення атмосферного повітря внаслідок викидів дрібнодисперсних зважених речовин як таку, що забезпечує визначення зони впливу підприємств і завданих збитків навколишньому природному середовищу.

6. Упроваджено в навчальний процес кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету методичні рекомендації щодо системного підходу до оцінювання техногенного



навантаження на довкілля від промислових викидів дрібнодисперсних зважених речовин, математичну модель поширення домішок, алгоритм вибору природозахисного обладнання, а саме в такі дисципліни: «Технології захисту навколишнього середовища», «Техноекологія», «Моделювання та прогнозування стану довкілля», «Процеси і апарати природоохоронних технологій» і «Сучасні методи захисту довкілля» (акт впровадження від 06.09.2022 р.).

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізованні стану проблеми, формуванні та розробленні основної ідеї й теми дисертації, створенні наукових положень системного підходу до розроблення комплексного екологічно безпечного рішення щодо зниження техногенного навантаження на довкілля від викидів промисловості, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, зокрема розробленні науково-методичних підходів до підвищення рівня екологічної безпеки від промислових підприємств [5; 9; 19], дослідженні впливу забруднюючих речовин, зокрема, дрібнодисперсного пилу  $PM_{2,5}$ , на навколишнє природне середовище і здоров'я людини [3; 7; 8; 15; 18], проведенні досліджень та аналізу режимних і конструктивних характеристик високоефективного природозахисного обладнання [1; 12; 13; 20; 22; 25], дослідженні механізмів і процесів зниження вмісту забруднюючих речовин у компонентах навколишнього природного середовища [11; 16; 21; 44], математичному описі складових механізмів пиловловлення в високоінтенсивних конструкціях апаратів із регулярною пульсаційною насадкою [16; 24], моделюванні та прогнозуванні зони впливу промислових об'єктів на навколишнє природне середовище та реалізації програмних застосунків для інформування громадськості [4; 6; 10; 14; 23; 27; 43], розробленні алгоритмів та програмних застосунків для вибору природозахисного обладнання з метою підвищення рівня екологічної безпеки виробництв [2; 15; 17; 19; 22].

Вищезазначена нумерація робіт, виконаних у співавторстві, відповідає списку праць дисертанта, наведеному у додатку А дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові й практичні результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах всеукраїнського й міжнародного рівнів: IV–IX Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 23–26 квітня 2013 р.; 14–17 квітня 2015 р.; 18–21 квітня 2017 р.; 16–19 квітня 2019 р.; 21–24 квітня 2020 р.; 20–23 квітня 2021 р.; 19–22 квітня 2022 р.); X Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії» (м. Переяслав-Хмельницький, 30–31 січня 2015 р.); XXI Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки» (м. Київ, 5–9 квітня 2021 р.); I Міжнародній науково-теоретичній конференції «Formation of innovative potential of world science» (м. Тель-Авів (Ізраїль), 7 травня 2021 р.); Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Theoretical and empirical scientific research: concept and trends» (Oxford; Vinnytsia, May 28, 2021); IX Міжнародній науковій конференції молодих учених: «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» (м. Харків, 25–26 листопада 2021 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022» (м. Полтава, 26–27 травня 2022 р.); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку» (м. Любляна (Словенія), 7 липня 2022 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сталий розвиток країни в рамках європейської інтеграції» (м. Житомир, 30 листопада 2022 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 44 наукових праці, із яких: 1 монографія у співавторстві, 1 розділ колективної монографії, 23 статті, зокрема, 16 статей у наукових фахових виданнях із переліку МОН України, 7 статей у зарубіжних наукових періодичних

виданнях та виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus і Web of Science), 17 матеріалів доповідей у збірниках праць конференцій, 1 підручник та 1 навчальний посібник.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, що вміщує **398** найменувань на **47** сторінках, та **9** додатків на **24** сторінках. Загальний обсяг дисертації становить **343** сторінки, із яких основний текст – **235** сторінок, робота містить **70** рисунків та **18** таблиць.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕХНОГЕННЕ НАВАНТАЖЕННЯ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ВІД НАДХОДЖЕННЯ В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ВИКИДІВ, ЩО МІСТЯТЬ ДРІБНОДИСПЕРСНІ ЗВАЖЕНІ РЕЧОВИНИ

### 1.1 Дослідження питання викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини

Охорона навколишнього природного середовища, раціональне використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки населення мають важливе значення для сталого розвитку регіонів та країни в цілому. Це є невід'ємною умовою для гармонійної взаємодії людини та природи, а також для забезпечення раціонального використання та безпечного відтворення природних ресурсів. Отже, для забезпечення сталого розвитку регіону і країни, на території України необхідно здійснювати політику, яка приділяє першочергову увагу охороні навколишнього природного середовища, раціональному використанню природних ресурсів та забезпеченню екологічної безпеки життєдіяльності населення. Ця політика повинна сприяти гармонійній взаємодії суспільства та природи, а також забезпеченню раціонального використання, охорони і безпечного відтворення природних ресурсів.

Серед техногенних чинників формування екологічної небезпеки слід виділити забруднення атмосферного повітря викидами промислових підприємств, які містять дрібнодисперсні зважені речовини. Осадження забруднюючих речовин з пилогазових викидів промислових підприємств призводить до забруднення ґрунту і міграції важких металів в підземні і поверхневі води, тобто є ключовим фактором формування екологічної безпеки [1, 2].

Існуюче надходження дрібнодисперсних зважених речовин в навколишнє середовище характеризується довготривалим часом існування, демонструє високий ступінь забрудненості і широке розповсюдження на великі відстані [3–7], що говорить про значний регіональний і глобальний аспекти впливу на довкілля.

Зростаючий науковий інтерес до забруднення повітряного середовища дрібнодисперсними зваженими частками пояснюється їх важливим значенням для екологічної безпеки [8, 9]. Дослідженню питання викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини приділяється значна кількість міжнародних наукових публікацій (рис. 1.1).

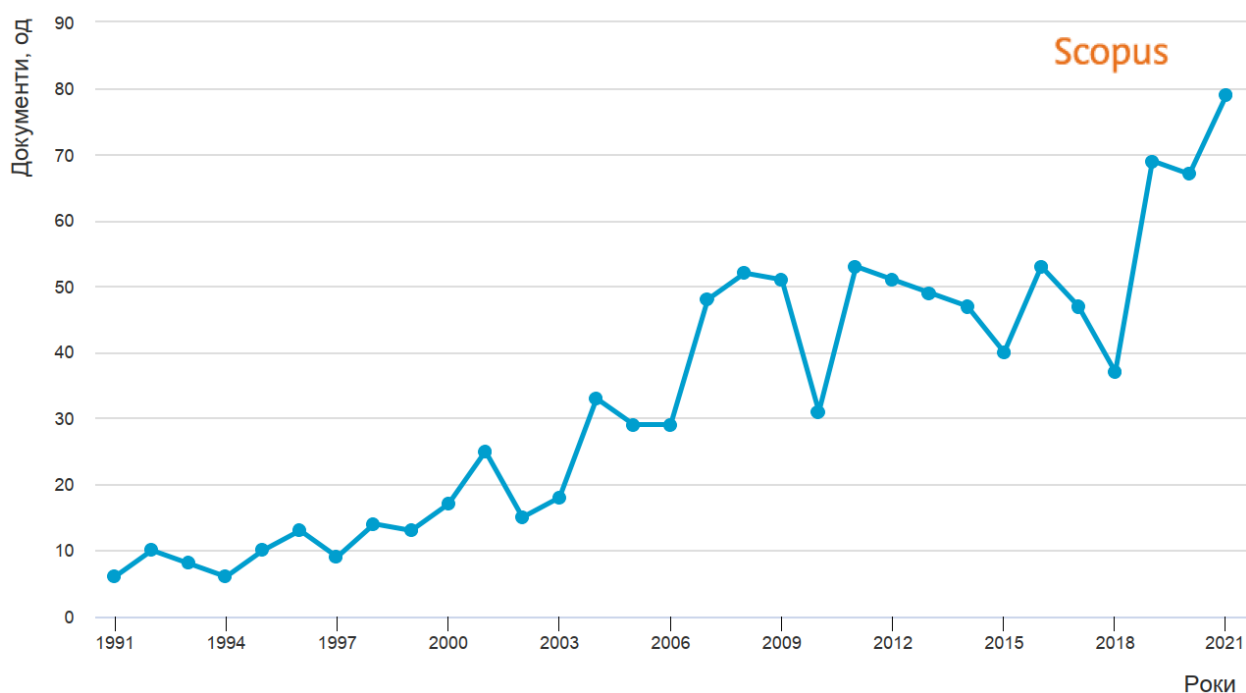


Рисунок 1.1 – Кількість наукових публікацій за темою аерозольних викидів (у промисловості) бази даних Scopus

Потужний промисловий розвиток північної півкулі планети супроводжується щільним розташуванням джерел викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини. Саме тому найбільша зацікавленість проблемою різних за дисперсним складом викидів твердих забруднюючих

речовин і їх впливу на довкілля припадає на дослідників із Китаю та США (рис. 1.2). Найбільш відомі вчені за останні 20 років, що досліджують питання викидів дрібнодисперсних зважених речовин, наведені на рис. 1.3.

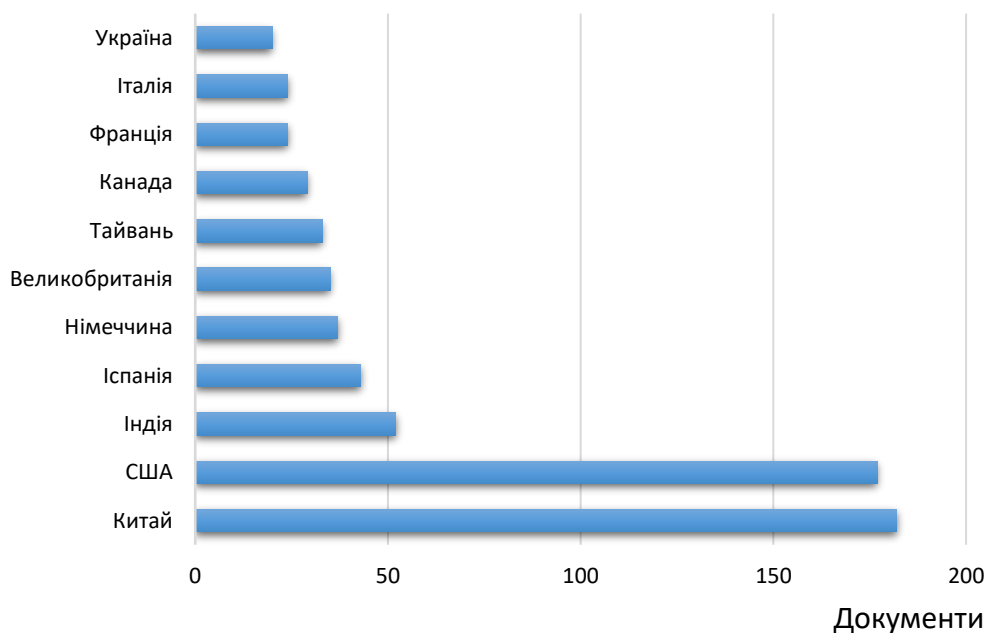


Рисунок 1.2 – Наукові публікації за країною походження в базі даних Scopus

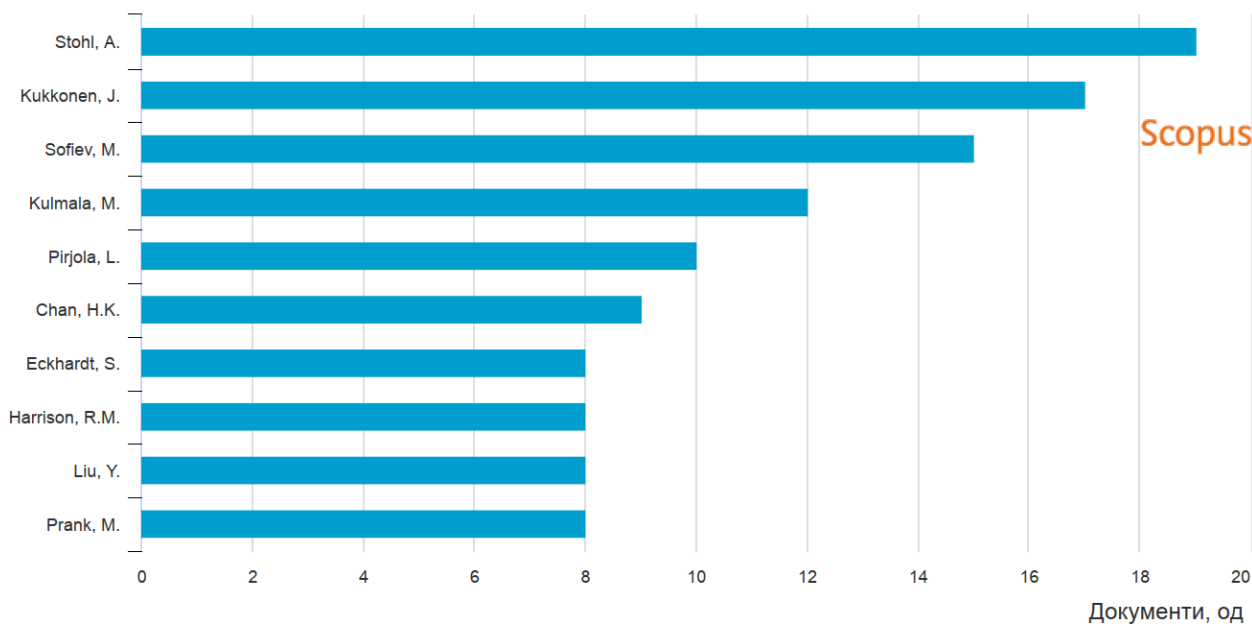


Рисунок 1.3 – Перелік вчених та кількість публікацій в базі даних Scopus щодо питання промислових викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини.

Актуальність теми підтверджується аналізом бази даних Scopus за напрямком досліджень – викиди аерозолів у теплоенергетиці та хімічній промисловості, який вказує на те, що кількість наукових публікацій за останні 10 років збільшилась у два рази.

Відповідно до основних напрямів міжнародної та державної екологічної політики України важливим стратегічним завданням екологічної безпеки і природоохоронної діяльності будь-якої території є оцінка впливу та прогнозування надходження аерозольних часток в атмосферу. Розуміння питання надходження, фізико-хімічних характеристик і обсягів викидів, дозволяє встановити допустимі межі техногенного впливу для подальшого прийняття раціональних і ефективних організаційно-технічних природозахисних рішень.

## **1.2 Аналіз викидів і утворення аерозольних домішок в атмосфері**

Забруднення атмосферного повітря є однією з найважливіших еколого-гігієнічних проблем для більшості міст світу [10-23]. Рівень забруднення повітряного середовища в межах населеного пункту визначається змінами викидів промислових підприємств, транспортної інфраструктури, а також індивідуальними метеорологічними умовами, унікальними для кожного міста. Вміст у повітрі зважених речовин є одним з істотних показників якості атмосферного повітря в міському середовищі.

Тверді частинки в основному утворюються при спалюванні палива в різних галузях виробництва [24-27], включаючи транспорт, енергетику, побут, промисловість та сільське господарство, що вимагає прийняття раціональних організаційно-технологічних рішень з метою зменшення негативного впливу на довкілля і людину [28-35].

Для оцінки обсягів викидів дрібнодисперсних речовин в атмосферне повітря було проведено порівняльний аналіз бази даних по викидам забруднюючих речовин Організації економічного співробітництва та розвитку

(OECD) [36] та базу даних Державної служби статистики України [37]. Порівняння наведено на рис. 1.4.

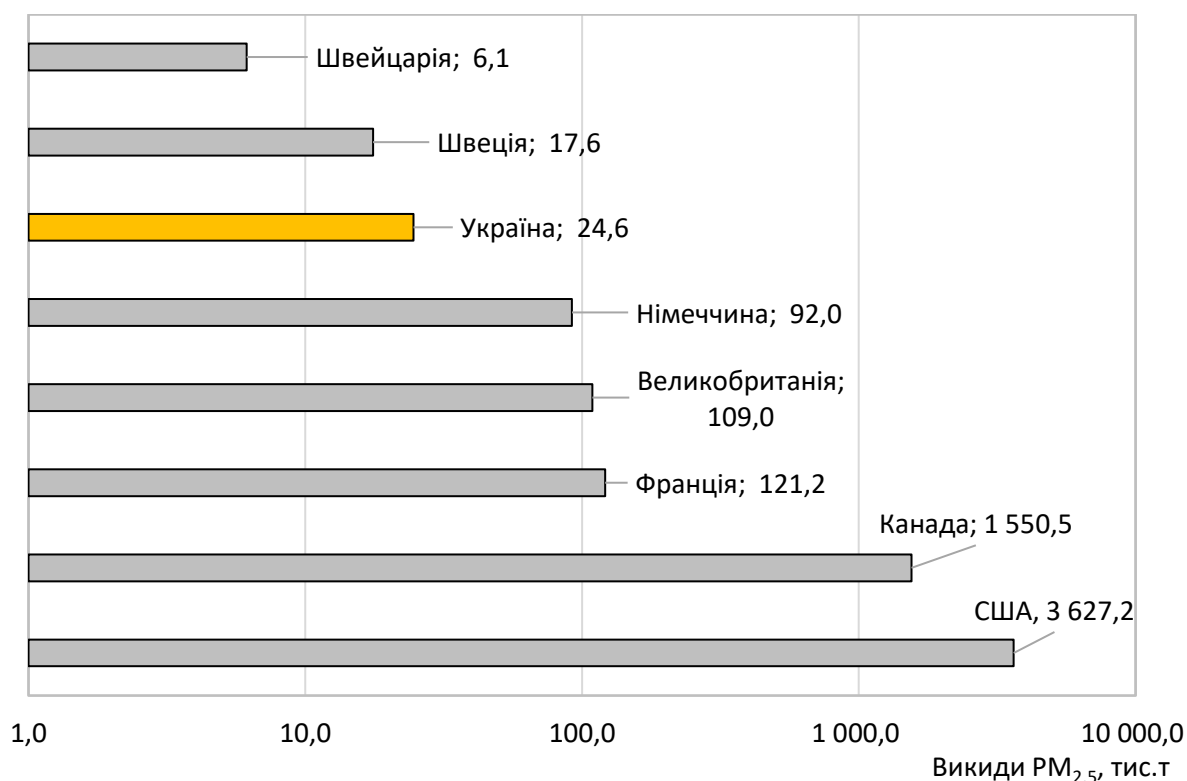


Рисунок 1.4 – Викиди твердих дрібнодисперсних речовин в Україні та деяких країнах світу (станом на 2021 рік)

Як бачимо на рис. 1.3 Україна за обсягами викидів  $PM_{2,5}$  посідає далеко не перші місця, випереджаючи доволі прогресивну в екологічній діяльності Швецію.

Мережа спостережень ДСС України фіксує тверді частки  $PM_{2,5}$  не на усіх постах спостережень і не в кожному місті через нестачу сучасного вимірювального обладнання. Тому, пил вимірюється у загальній масі, а потім використовуються коригувальні коефіцієнти для оцінки приблизного значення дрібнодисперсного пилу.

Аналіз бази даних Державної статистики України, щодо викидів дрібнодисперсних речовин  $PM_{2,5}$  наведено в табл. 1.1.



Таблиця 1.1 – Викиди  $PM_{2,5}$  в Україні

Забруднююча речовина	Роки											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Зважені частки (розмір 2,5 мкм та менше), тис.т.	40,7	42,3	34,5	27,1	24	19,7	34,1	13,5	21,2	24,6	22,3	24,7

Аналіз бази даних OECD щодо викидів дрібнодисперсних частинок  $PM_{2,5}$  в Україні за основними джерелами утворення наведено на рис. 1.5.

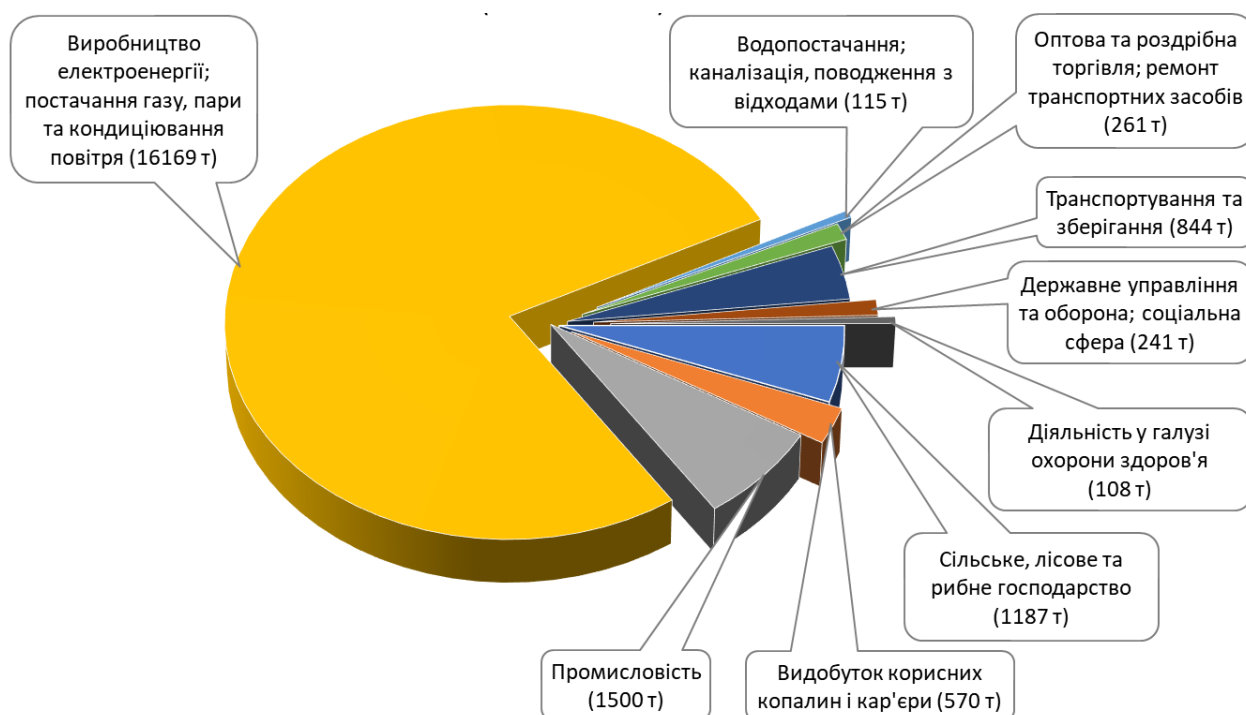


Рисунок 1.5 – Викиди зважених речовин за основними видами діяльності в Україні (2021 рік)

Аналіз рис. 1.5 дозволяє встановити, що основними джерелами забруднення атмосфери дрібнодисперсними зваженими речовинами є підприємства теплоенергетики та газотранспортна система. Весь ланцюжок виробництва теплової енергії - видобуток, транспортування, переробка сировини, вироблення енергії - є стабільним джерелом утворення викидів дрібнодисперсних зважених речовин в атмосферне повітря, що впливають на населення як невеликих селищ, так і великих міст.

За оцінкою фахівців, внесок теплової енергетики в забруднення повітряного басейну доходить до 27-30% загальної кількості забруднень, при цьому тверді зважені частинки складають 31% від загальної кількості викидів цієї галузі.

В кінці 2020 року Програма розвитку ООН в Україні та Програма розвитку ООН в Молдові уклали партнерство з Європейським космічним агентством та його програмою EO Clinic з метою тестування застосування супутникових даних для отримання інформації про забруднення повітря.

Дані з супутника «Сентинел-5» та програми Copernicus Sentinel-5p були використані для моніторингу рівнів забруднення повітря в Україні  $PM_{2.5}$  та визначення його поширення в містах та регіонах з розвинутою промисловістю. Використання таких даних дозволяє аналізувати забруднення повітря на великих територіях та визначати його джерела. Аналіз даних з супутників є ефективним інструментом для моніторингу забруднення повітря, оскільки ці дані можуть бути отримані з будь-якої точки земної поверхні, незалежно від того, чи доступні вони з землі. Результати моніторингу, який проводився протягом 16 місяців у період з травня 2018 року по липень 2020 року, наведено на рис. 1.6.

Міста з найвищою концентрацією  $PM_{2.5}$  - це зазвичай Кривий Ріг, Дніпро і Запоріжжя, де вказаний рівень було перевищено більш ніж 200 разів за період дослідження, та Маріуполь і Донецьк, де рівень було перевищено більш ніж 400 разів за той самий період.

У роботі [38] наведено результати досліджень, які підтверджують, що зниження рівня забруднення приземного шару атмосфери в результаті тривалих і безперервних організаційно-технологічних рішень на виробничих об'єктах (вдосконалення технологій, газоочисного обладнання) позитивно впливає на здоров'я населення. Це у свою чергу дозволяє оцінити ефективність організаційно-технічних рішень і розробляти рекомендації щодо покращення стану атмосферного повітря населених місць.

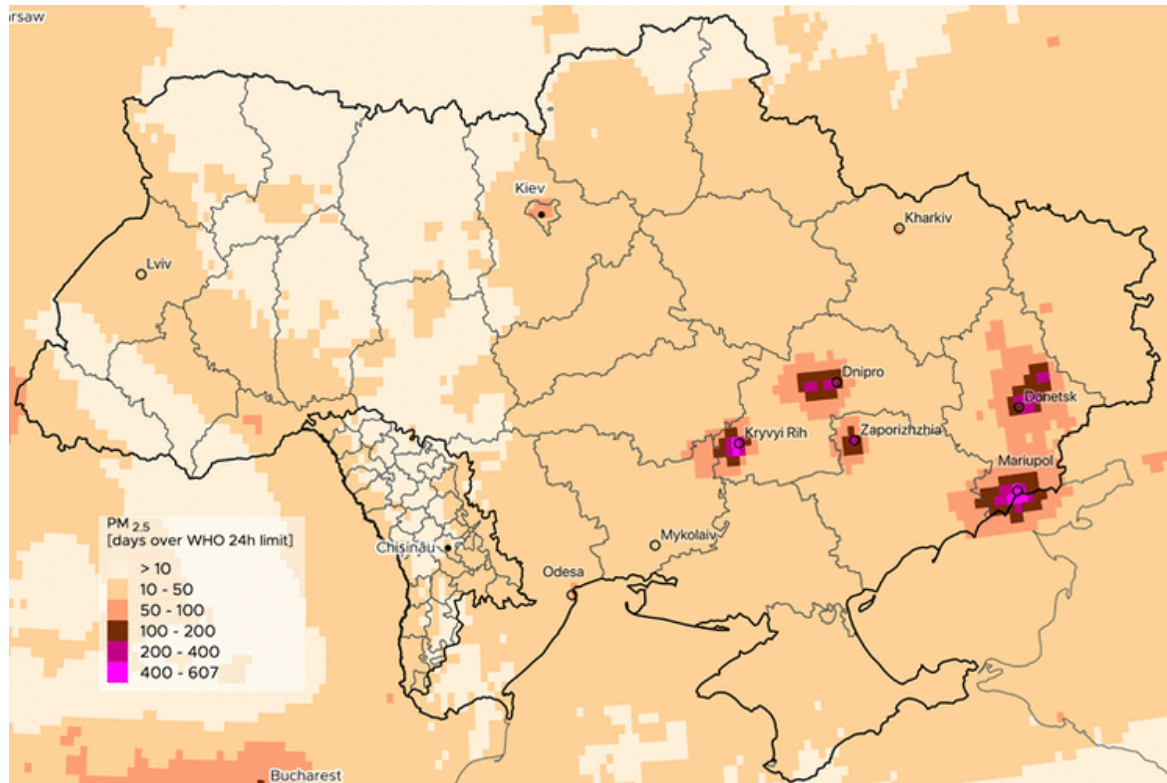


Рисунок 1.6 – Супутникова («Сентинел-5») візуалізація забруднення повітря  $PM_{2.5}$  в Україні за 16 місяців моніторингу

Незадовільний екологічний стан та загрозливі демографічні тенденції, зростання захворюваності та смертності серед населення вимагають ретельного вивчення ситуації, аналізу, оцінки і прогнозу стану здоров'я населення та середовища життєдіяльності людини, виявлення причинно-наслідкових зв'язків між станом здоров'я населення та впливом на нього факторів довкілля для розробки й впровадження профілактичних заходів щодо покращення загального стану здоров'я населення [39].

### **1.3 Аналіз відповідності українського законодавства вимогам Європейського союзу щодо охорони атмосферного повітря**

Екологічна складова національної безпеки України на сучасному етапі розвитку промисловості, коли техногенне навантаження на довкілля у 4-5

разів перевищує аналогічний показник у розвинутих країнах, є важливим вектором внутрішньої і зовнішньої політики нашої держави.

Вже більше 10 років як наша країна є підписантом і ратифікувала значну кількість міжнародних регуляторних документів і йде шляхом імплементації низки законодавчих актів, що спрямовані на зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, зокрема промисловістю з метою зниження негативного впливу на довкілля, забезпечення належних умов середовища життєдіяльності та захисту здоров'я населення. З них основними є: «Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок» (Розпорядження КМУ від 08 листопада 2017 р. № 796), «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері промислового забруднення» (Розпорядження КМУ від 22 травня 2019 р. № 402-р), «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» (Розпорядження КМУ від 14 серпня 2019 р. № 827) [40-42].

Чинна політика України у сфері охорони атмосферного повітря сформульована в Законі України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» (від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII), яким передбачається виконання ратифікованих міжнародних документів щодо протидії зміні клімату (Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату та Кіотський протокол до даної конвенції, Паризька угода до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату) та поліпшення якості атмосферного повітря (Конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані, Віденська конвенція про охорону озонного шару; Монреальський протокол про речовини, що руйнують озонний шар; Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі) з метою покращення його якості та посилення реагування на наслідки зміни клімату і досягнення цілей сталого низьковуглецевого розвитку всіх галузей економіки України [43-49].

В Україні регулювання викидів від стаціонарних джерел здійснюються на підставі нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ), які встановлені наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел» від 27 червня 2006 року №309 (zareєстровано в Міністерстві юстиції України 1 серпня 2006 р. за №912/12786).

Чинна нормативно-законодавча база України [50] регулює техногенний вплив на навколишнє природне середовище шляхом використання поняття ГДК. Основою нормування викидів шкідливих речовин в атмосферу від промислових джерел служать фактичні викиди, які вимірюють при проведенні інвентаризації. Кількісні та якісні характеристики викидів визначаються в основному прямими вимірами про номінальному навантаженні технологічного обладнання. Медико-гігієнічне нормування вмісту забруднюючих речовин, яке здійснюється через введення ГДК, має ряд недоліків, зокрема:

1) не нормується допустима повторюваність перевищень ГДК як максимально разових, так і середньодобових;

2) застосування джерела викидів як зразка для нормування фактичного викиду не дозволяє враховувати відхилення від очікуваних значень та порівнювати їх з показниками іншого обладнання або альтернативних технологій;

3) шкідливі викиди оцінюються не за джерелами, а на зрізі димової труби.

4) використання нормативних значень ГДК не передбачає вивчення впливу шкідливих речовин та їх сполук на всю біосферу, а також збитків від дії на матеріальні фонди.

У світовій практиці стандарти вмісту дрібнодисперсних частинок в атмосферному повітрі встановлено офіційними документами Всесвітньої організації охорони здоров'я та Євросоюзу (National ambient air quality

standards for particulate matter, 2006; WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, 2006).

В табл. 1.2 наведено порівняння стандартів концентрацій  $PM_{2,5}$  в Україні, США, Європі і деяких країнах Азії, а також рекомендації Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ). Як видно із табл. 1.2 стандарти безпечних концентрацій дрібнодисперсних часток в Україні є більш жорсткими ніж у деяких країнах світу. Однак норми допустимих концентрацій це лише стандарт безпечного довкілля, які в реальних умовах часто не відповідають дійсності [51].

Таблиця 1.2 – Стандарти концентрацій  $PM_{2,5}$  в атмосферному повітрі в Україні та деяких інших країнах

Стандарт	Середня річна, мг/рік	Середньодобова ГДК, мг/рік
Україна	0,01	0,025
США	0,012	0,025
ЄС	0,025	не нормується
Китай	0,035	0,075
Японія	0,015	0,035
Південна Корея	0,025	0,05
Рекомендації ВООЗ (2021 року)	0,004	0,015

Україна обрала курс на інтеграцію в європейську спільноту, що вимагає з боку держави виконання завдань щодо дотримання певних екологічних стандартів безпеки і здійснення відповідальної екологічної політики з охорони навколишнього природного середовища та підвищення якості атмосферного повітря на рівні загальноприйнятих міжнародних нормативних документів. У червні 2022 року Україна отримала статус країни-кандидата в члени ЄС, який

підкреслює прагнення до євроінтеграції та готовність здійснювати природоохоронні реформи.

В рамках Угоди про асоціацію між Україною та ЄС відбувається апроксимація законодавства України до відповідних прав та політик ЄС. Додатком ХХХ до Угоди, глава 6 «Навколишнє природне середовище» розділу V «Економічне і галузеве співробітництво», визначено перелік директив у галузі охорони атмосферного повітря, які необхідно адаптувати, зокрема: Директива № 2008/50/ЄС про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи; Директива № 2010/75/ЄС про промислові викиди (всебічне запобігання і контроль забруднень), що стосується промислового забруднення та техногенних загроз та ін. [52-55].

Одна з найскладніших реформ, яку Україна має провести у рамках інтеграції до Європейського союзу є імплементація Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди. Проведення цієї реформи входить до переліку 9 екологічних пріоритетів у Національному плані відновлення України після війни.

Запровадження в українське законодавство положень Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди передбачає два ключові нововведення:

1) реформується дозвільна система, в рамках якої запроваджується інтегрований дозвіл – єдиний документ, який замінює окремі дозволи на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря.

2) запроваджуються використання найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ) – перелік рекомендованих технологій та визначених на їх основі допустимих обсягів промислового забруднення, а також методів управління, зокрема екологічного менеджменту, моніторингу тощо.

Виконання промисловим підприємством заходів, визначених у НДТМ, має призвести до зменшення впливу на природу від його діяльності, а за можливості – запобігти такому впливу.

Для того щоб ефективно імплементувати вимоги Директиви 2010/75/ЄС в Україні, необхідно проводити системну роботу зі створення і вдосконалення національної системи поводження з викидами забруднюючих речовин. Це включає в себе розробку та впровадження відповідних нормативно-правових актів, створення моніторингових систем, проведення науково-технічних досліджень та розробок, підвищення кваліфікації фахівців тощо.

Одним з важливих етапів імплементатії Директиви є забезпечення дотримання її вимог підприємствами та організаціями, що працюють у сфері виробництва та використання забруднюючих речовин. Це може бути досягнуто через проведення перевірок та аудитів діяльності підприємств, встановлення механізмів контролю за викидами та поводженням з відходами, а також застосування санкцій у разі порушення вимог Директиви.

Крім того, важливим аспектом є забезпечення інформування та участі громадськості у процесі імплементатії Директиви. Це дозволяє створити ефективну систему моніторингу та контролю за дотриманням вимог Директиви, а також забезпечити ефективну взаємодію між владою та громадськістю у питаннях охорони навколишнього середовища.

Для імплементатії Директиви 2010/75/ЄС в Україні була прийнята постанова Кабінету Міністрів України від 23 липня 2014 року №496 «Про затвердження Положення про інтегрований дозвільний процес у сфері поводження з відходами та викидами забруднюючих речовин». Це Положення містить вимоги щодо отримання дозволів на викиди забруднюючих речовин та поводження з відходами, які повинні відповідати вимогам Директиви 2010/75/ЄС.

Імплементатія Директиви 2010/75/ЄС є важливим кроком в забезпеченні екологічної безпеки та здоров'я людей в Україні. Для досягнення цієї мети має бути здійснена комплексна робота з усунення відставання від європейських стандартів, підвищення екологічної свідомості населення та залучення громадськості до процесів вирішення екологічних проблем. Також важливо



забезпечити належну координацію між відповідними органами влади, організаціями та громадськістю в процесі імплементації Директиви.

Україна зобов'язалась до 2023 року імплементувати Директиву 2010/75/ЄС, тож необхідно активно працювати над її виконанням, щоб запобігти можливим санкціям та іншим наслідкам порушення вимог Директиви. Необхідно зробити все можливе, щоб забезпечити ефективний контроль за дотриманням вимог Директиви, зменшити кількість викидів та забруднення довкілля та сприяти створенню здорового та безпечного середовища для мешканців України.

Крім того, важливо враховувати особливості національного законодавства та умови його реалізації, зокрема в Україні, та приділяти увагу питанням реформування екологічного законодавства та створення відповідних механізмів контролю за його дотриманням.

Для імплементації Директиви 2010/75/ЄС у 2023 році Верховна Рада України також зареєструвала відповідні законопроекти у сфері запобігання промислового забрудненню:

- 1) Про забезпечення конституційних прав громадян на безпечне для життя і здоров'я довкілля (№6004-д);
- 2) Про запобігання, зменшення та контроль забруднення, що виникає в результаті промислової діяльності (№6004-1);
- 3) Про забезпечення конституційних прав громадян на безпечне для життя і здоров'я довкілля (№6004-2).

Реалізація відповідних законодавчих документів сприяє впровадженню екосистемного підходу в галузеву політику та удосконалення системи інтегрованого екологічного управління для гарантування екологічно безпечного навколишнього природного середовища для життя і здоров'я населення, впровадження екологічно збалансованої системи природокористування та збереження природних екосистем.

Згідно з Планом імплементації Директиви 2010/75/ЄС (Розпорядження Кабінету Міністрів України № 371-р від 15.04.2015 р.) нове технологічне

устаткування на промислових об'єктах в Україні з 01.01.2018 року мало відповідати її положенням [56]. Зважаючи на високу зношеність більшості існуючих технологічних ліній промислових підприємств, що не можуть бути вчасно модернізовані, під час 13-ої Ради Міністрів Енергетичного Співтовариства було прийнято рішення D/2015/07/МС-EnC щодо відтермінування в Україні досягнення європейських нормативів викидів від наявного устаткування до кінця 2028 року із забезпечення скорочення граничних значень викидів пилу.

Таким чином, імплементація Директиви 2010/75/ЄС в Україні потребує великих зусиль та співпраці між різними зацікавленими сторонами. Але якщо усі залучені сторони працюватимуть разом, можна досягти значних успіхів у покращенні стану довкілля та забезпеченні сталого розвитку України.

#### **1.4 Екологічна безпека техногенно навантаженого регіону**

У сучасних умовах поняття безпеки визначається як оптимальний нормативний стан функціонування людських систем із здатністю активно протистояти негативним змінам цього стану. Головними практичними принципами забезпечення екологічної безпеки є дотримання встановлених державою та органами влади допустимих рівнів впливу на людину та природне середовище; здійснення раціонального природокористування; своєчасне виявлення, відновлення порушених екологічних систем і природних комплексів; розробка комплексних показників оцінки екологічної безпеки територій та акваторій, прогнозування, виявлення зон екологічної кризи, лиха, катастрофи. Оцінці впливу забруднювачів на стан екологічної безпеки присвячені роботи провідних фахівців [57-71].

За результатами досліджень в роботі [57] встановлено, що забруднення атмосферного повітря визначає стан безпеки регіону.

Оптимальне і ефективне управління екологічною безпекою [58] можливе тільки на основі моніторингу, об'єктивно присутнього в будь-якому регіоні, із

застосуванням відповідних заходів щодо зменшення до мінімуму негативного впливу джерел небезпеки (або по можливості – ліквідація цих джерел).

Техногенні об'єкти, зокрема промислові підприємства, є головним джерелом формування екологічної небезпеки, пов'язаної з техногенним забрудненням навколишнього природного середовища, особливо в індустріально розвинених регіонах. [59-62].

Будь-яка виробнича діяльність несе в собі приховану екологічну загрозу, тому визначення «екологічно безпечне виробництво» є умовним, його можна віднести до припустимого рівня потенційної небезпеки. Екологічні питання стосуються практично всіх аспектів діяльності виробництва, а екологічний ризик може виникнути на будь-якій стадії діяльності підприємства. Факторами, які сприяють виникненню екологічного ризику, є антропогенні або техногенні зміни природних об'єктів і чинників; господарська діяльність людини; використання екологічно небезпечних об'єктів; значна зношеність виробничого обладнання. Рівень екологічного ризику зростає через те, що практично неможливо оцінити загальну реакцію природного середовища на сумарний вплив окремих видів антропогенної діяльності, що носять синергетичний характер.

Проведено критичний аналіз особливостей формування екологічної небезпеки в техногенно навантаженому регіоні [63]. Регіональна техногенна небезпека формується за рахунок локальних джерел, таких як техногенні об'єкти (підприємства, споруди тощо), які створюють зони неприйнятної небезпеки. Для ефективного управління безпекою на регіональному рівні, автор пропонує аналізувати шкідливий вплив зовнішніх зон небезпеки, а також враховувати стан небезпеки на території самого техногенного об'єкту (рис. 1.7).

У більшості випадків основний вплив на процес формування техногенної небезпеки мають чинники, що присутні в самому регіоні [64-68].

Також особливої уваги заслуговує представлена у роботах [69, 70] модель формування техногенної небезпеки. Автори пропонують класифікувати всі

відходи як забруднювачі, оскільки деякі з них не властиві природному середовищу, а інші збільшують природний вміст речовин та енергії в компонентах підсистеми конкретного регіону. У моделі показано, що техногенні джерела спричиняють негативні процеси в навколишньому середовищі, які під впливом природних та природно-антропогенних чинників розповсюджуються і змінюють стан середовища, що веде до екологічного дисбалансу в соціально-економічній підсистемі та формування техногенної небезпеки.



Рисунок 1.7 – Диференціація шкідливого впливу об'єкту формування техногенної небезпеки на елементи соціально-економічної і природної підсистем регіону.

Значний інтерес становить розроблена автором структурна схема техногенної небезпеки регіону [57]. Така ієрархічна структура, на відміну від інших, має явно визначені ознаки системності, ієрархічності стосовно основної структури екологічної небезпеки, а також елемент забезпечення динамічності (пластичності) структури. Техногенна небезпека включає види, які сформовані чинниками (підвидами небезпеки) забруднення

навколишнього природного середовища: хімічними, фізичними, біологічними, трансформації ландшафтів.

Сутність процесів, що відбуваються в техносфері, полягає в трансформації речовини та енергії. При цьому в природне середовище неминуче надходять речовинні та енергетичні забруднювачі, формуючи техногенну небезпеку. Різноманіття процесів у техносфері визначає широкий спектр чинників формування техногенної небезпеки. Вид техногенної небезпеки, сформованої дією хімічних чинників, визначається наявністю шкідливих речовин, що містяться у викидах в атмосферу, скидах у водний басейн, відходах. Ці чинники можуть розрізнятись, наприклад: за способом утворення забруднювачів; за ступенем токсичності шкідливих речовин; за рівнем сформованого ними забруднення і т.п.

Для оцінки рівня впливу на біосферу конкретного підприємства необхідні показники та методика оцінки за цими показниками, які дозволять намітити напрямки підвищення екологічної ефективності його діяльності.

Оцінка рівня техногенної небезпеки промислових об'єктів є складним завданням через різноманітність технологічних процесів, які застосовуються на різнопрофільних підприємствах, а також відмінності умов формування шкідливих речовин та специфічності природоохоронних заходів, необхідних для запобігання їх викидам в навколишнє середовище [71].

Розроблені на сьогоднішній день методики для інтегральної оцінки впливу на довкілля можна розділити на три групи: методики, які базуються на виділенні укрупнених показників, що вимагають експертної оцінки; методики розрахунку екологічних індикаторів; методики розрахунку завданого економічного збитку. В Україні застосовуються в основному методики третьої групи, в яких не враховується міграція забруднюючих речовин у біосфері, їх накопичення в харчових ланцюгах, утворення вторинних забруднювачів та ін. Крім того, прийняті методики не враховують життєвий цикл існування продукції. Я наслідок, отримані результати часто важко порівнювати та аналізувати.

При оцінці техногенного навантаження виникають розбіжності стосовно визначення кількісних характеристик техногенного навантаження й на нормативному рівні. Згідно з Рекомендацією ВООЗ кількісною мірою техногенного навантаження є ризик, що визначається як «очікувана частота небажаних ефектів, що виникають від заданої дії забрудника», тоді як Американське Агентство Охорони Довкілля (EPA US) характеризує його як «ймовірність ушкодження, захворювання або смерті при певних обставинах» [72]. Структура екологічних ризиків може бути виражена через систему матриць, які враховують всі об'єктивні та суб'єктивні фактори природокористування.

Згідно проведених досліджень [73] зв'язок між екологічним ефектом технологічних процесів та рівнем техногенного навантаження залежить від показників екологічного ризику та ступеня впливу, які переведені до відносних одиниць з використанням методу пріоритетів та експертно-оціночного аналізу.

Для того, щоб розробити комплексні довгострокові рішення для зменшення впливу на довкілля, взаємозв'язок між навколишнім середовищем, суспільством та різними інституціями повинен бути адекватно зрозумілим. Це передбачає розуміння ключових соціальних, культурних та економічних зв'язків у суспільстві [74-77]. Завдяки кращому розумінню цих зв'язків можна визначити слабкі місця у цій системі, а екологічну небезпеку можна мінімізувати [78, 79].

На жаль, координація та комунікація між різними установами (елементами системи) та зацікавленими сторонами слабка. Немає належного механізму зворотного зв'язку щодо ефективності політичних заходів у країні, сектор досліджень і розробок має певні обмеження, а обізнаність громадськості про наслідки погіршення навколишнього середовища дуже обмежена.

Згідно з [14], саме навчальні та науково-дослідні установи, якщо їх правильно використовувати, мають достатній потенціал для вирішення питань

екологічної безпеки, щоб допомогти подолати розриви між політичними інституціями, державними органами, галузями промисловості та громадськістю. Однак, щоб сприяти підвищенню рівня екологічної безпеки в Україні, роль наукових (навчальних) установ має бути розширена, щоб вони могли охопити всіх важливих зацікавлених сторін, до яких належать урядові установи, міжнародні фонди, промисловість, неурядові організації та громадськість.

Ідеальна роль науково-дослідних установ для підтримки оптимального рівня екологічної безпеки в Україні зображена на рис. 1.8.

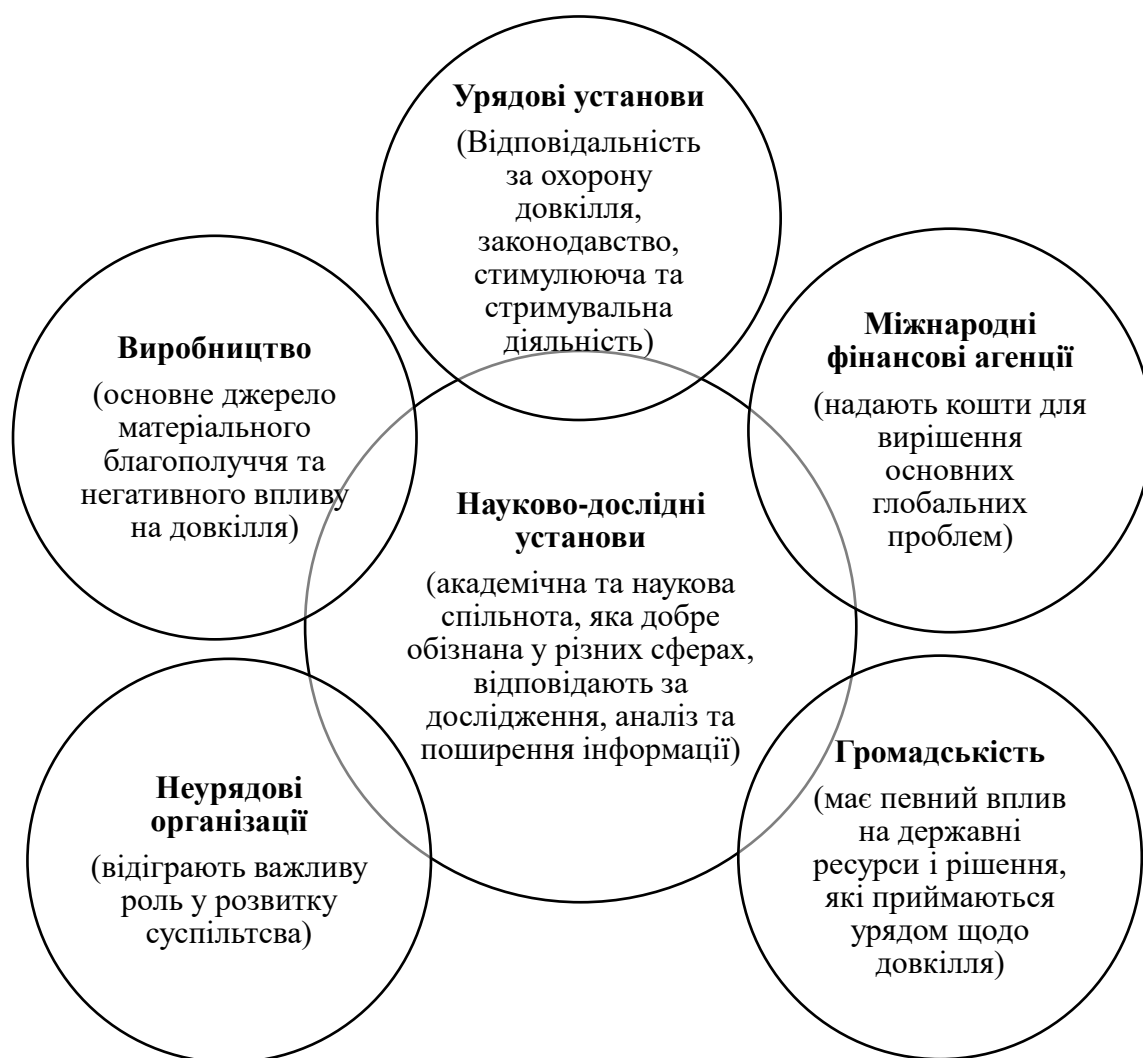


Рисунок 1.8 – Схема зв'язків для підтримки оптимального рівня екологічної безпеки

Науково-дослідні установи відіграють роль інтерпретації основної науки, залученої до виробничих процесів, інформування про останні події громадськості, надання базової інформації про моніторинг стану довкілля для роботи неурядових організацій.

Науково-дослідні установи також готують бази даних та надають своєчасний зворотний зв'язок для прийняття політичних рішень з ефективного управління навколишнім середовищем і діють як з'єднувальна ланка для забезпечення ефективної комунікації між громадськістю та іншими відповідними зацікавленими сторонами.

Підсумок поточного сценарію забруднення повітря, існуючих недоліків і ймовірного їх вирішення представлено на рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Схема методологічного процесу ефективного управління якістю повітря

Вирішення проблеми забруднення атмосферного повітря від промисловості потребує комплексного підходу та співпраці між різними



сторонами, включаючи підприємства, місцеві органи влади та громадськість, з метою забезпечення здорового та безпечного довкілля. Пропонуються наступні рекомендації з метою оперативного вирішення питання забруднення повітря від промисловості в Україні:

1. Проведення оцінки впливу на довкілля промислових підприємств: проведення детальної оцінки впливу технологічних процесів на довкілля, враховуючи кількість викидів, склад і токсичність речовин, які викидаються в атмосферу. Це допоможе визначити найбільш проблемні ділянки і складність проблеми.

2. Використання систем з прогнозування та оцінки потенційних негативних наслідків від надходження викидів забруднюючих речовин в приземний шар атмосфери.

3. Використання ефективного пилогазоочисного обладнання: встановлення сучасних систем фільтрації та комплексного очищення викидів може зменшити кількість шкідливих викидів і підвищити рівень якості атмосферного повітря для населення і довкілля у цілому.

4. Використання енергоефективних технологій: застосування енергоефективних технологій може зменшити викиди в атмосферу та знизити витрати на електроенергію, знижуючи споживання палива.

5. Співпраця із громадськістю: співпраця з місцевою громадськістю, екологічними організаціями та урядовими органами може допомогти у вирішенні проблем забруднення атмосферного повітря. Це може включати інформування мешканців про ризики забруднення, виконання регулярних перевірок викидів підприємств та спільні ініціативи з покращення якості повітря.

Отже, розуміння закономірностей формування екологічної небезпеки та її проявів є ключовим для розробки системи управління екологічною безпекою. Одним з головних методів забезпечення безпечного екологічного стану довкілля є передбачення можливих забруднень шляхом прогнозування та вживання необхідних природоохоронних заходів.

## **1.5 Аерозолі, особливості утворення, класифікація аерозолів**

Аерозольні забруднення атмосфери впливають на здоров'я людини, стан флори й фауни. Зниження потоку сонячного випромінювання зменшує утворення (під дією УФ-променів) вітаміну D<sub>3</sub>, брак якого негативно позначається на формуванні кісткових тканин, викликаючи захворювання рахітом [80]. УФ-промені знищують деякі мікроорганізми, виконуючи стерилізуючу дію. Недостатність УФ-променів підвищує ризик інфекційних бактеріальних захворювань у рослин і тварин, тому у зонах інтенсивного пилового забруднення виникає ряд специфічних захворювань. На відміну від хімічно інертних часток кварцу й азбесту, що діють на організм чисто механічно, дрібні частки металів або іони металів викликають утворення в крові токсичних продуктів біохімічних реакцій [80, 81].

Навіть незначна кількість аерозольних часток впливає на більшість характеристик газового середовища, враховуючи життєвонеобхідне для існування людства якісне атмосферне повітря, як середовище існування [82-87]. Як приклад, наявність ядер конденсації, кількість яких у повітрі набагато менша, ніж кількість молекул будь-якого газу, визначає можливість формування хмар, що має важливе значення для існування всіх живих організмів на Землі.

Основне джерело надходження в атмосферне повітря аерозолів антропогенного походження – викиди промисловості, які надходять у повітряне середовище у вигляді первинних аерозолів (викидаються безпосередньо в атмосферу) або утворюються в результаті вторинних процесів (шляхом складних фізико-хімічних перетворень первинних аерозолів).

### **1.5.1 Контроль вмісту аерозолів в приземному шарі атмосфери**

Дослідженням питання надходження аерозольних викидів у повітря і їх ідентифікації засобами дистанційного зондування (AERONET, SKYNET,

MODIS) (рис. 1.10) займається багато науковців починаючи з кінця минулого століття [88-94].

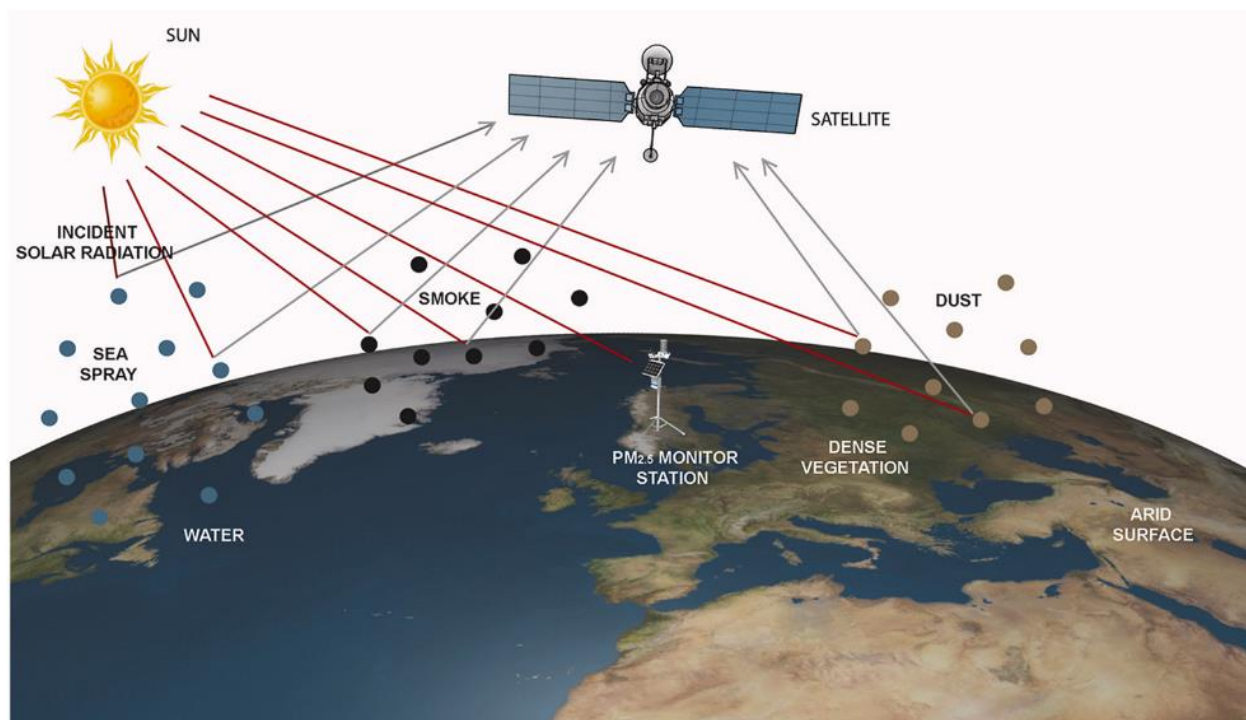


Рисунок 1.10 – Засоби дистанційного зондування дрібнодисперсних зважених речовин

Для вимірювання в реальному часі забруднення  $PM_{2.5}$  використовують мобільні станції моніторингу якості повітря, принцип роботи яких ґрунтується на роботі високотехнологічних лазерних датчиків частинок [95].

Більшість сучасних станцій є компактними за розміром, простими у налаштуванні, вимагають лише точки доступу WiFi та джерела живлення USB. При підключенні до WiFi всі дані також будуть зберігатись на сайті, де власник станції може скачати їх в кабінеті користувача. Також деякі станції обладнані модулем GPS – до кожного виміру додаються координати де він був знятий а також супутниковий час. Після підключення, рівні забруднення повітря повідомляються миттєво і в реальному часі на інтерактивних картах (рис. 1.11).

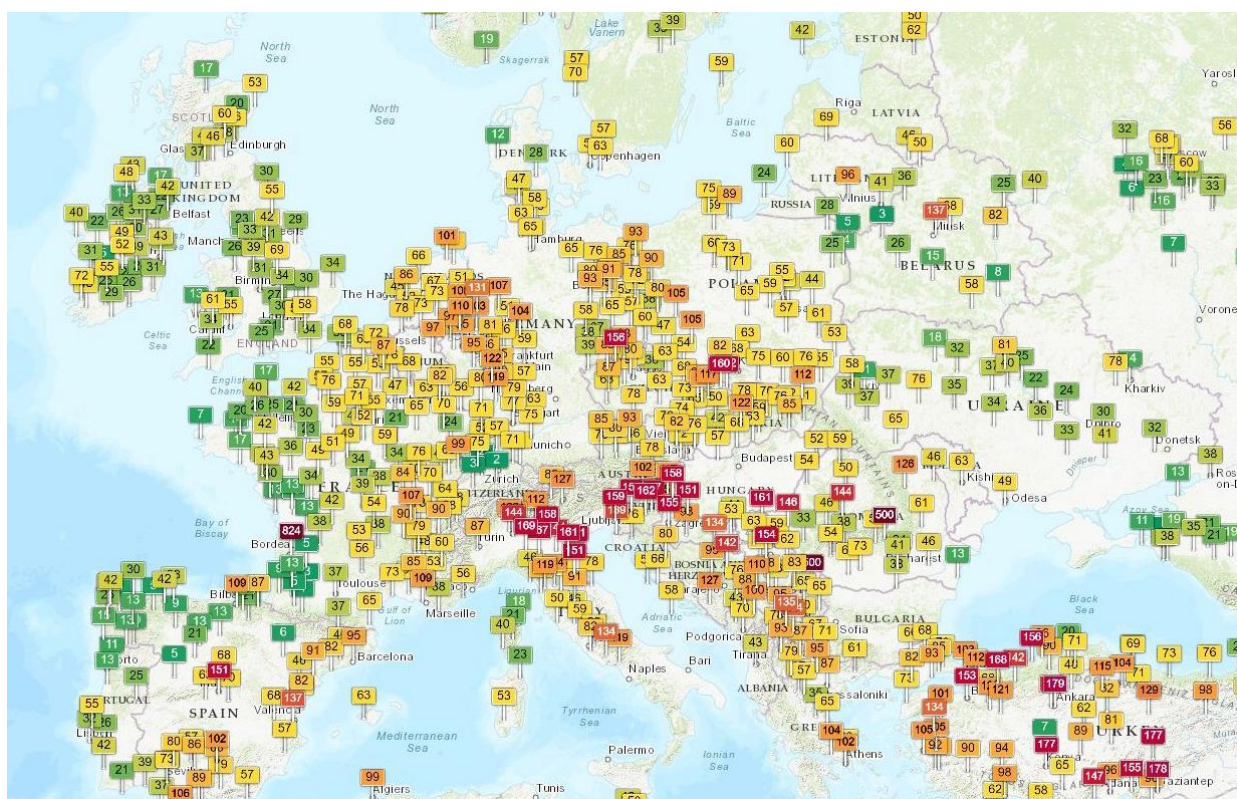


Рисунок 1.11 – Інтерактивна карта World Air Quality Index (WAQI.Info)

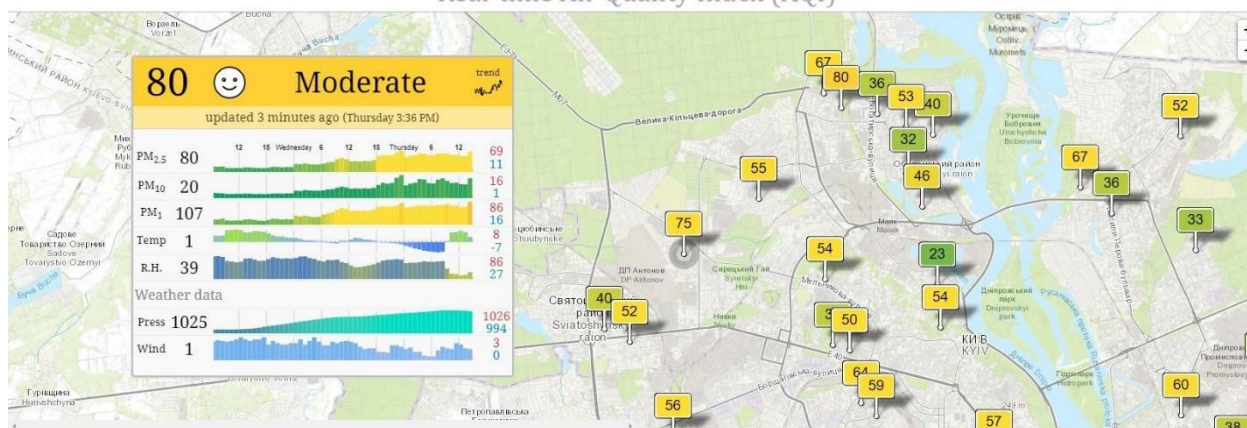
До системи громадського моніторингу якості повітря в Україні належить екологічний чат-бот – SaveEcoBot [96], який інформує про стан повітря у частині великих населених пунктів України.

Україна має ряд стаціонарних станцій моніторингу якості повітря, що контролюють рівень  $PM_{2.5}$  та інших шкідливих речовин у повітрі. Однак, наявність мобільних станцій моніторингу  $PM_{2.5}$  у різних регіонах України може бути обмеженою [97]. Так, порівняння можливостей станцій дослідження вмісту  $PM_{2.5}$  у містах Київ і Суми наведено на рис. 1.12.

Для контролю вмісту аерозолів в приземному шарі атмосфери також використовуються спеціальні прилади – аерозольні монітори. Ці монітори збирають зразки повітря та вимірюють концентрацію аерозольних частинок різного розміру та складу. Вимірювання проводяться на різних висотах над різними джерелами забруднення повітря, наприклад, на промислових об'єктах, у міських районах, поруч з дорогами тощо.



Ihoria Turchyna Street, Kyiv, Ukraine, Kyiv, Ukraine Air Pollution<sub>UA</sub>  
Real-time Air Quality Index (AQI)



vulytsia Zasumska, 3, Sumy, Ukraine, Sumy, Ukraine Air Pollution<sub>UA</sub>  
Real-time Air Quality Index (AQI)

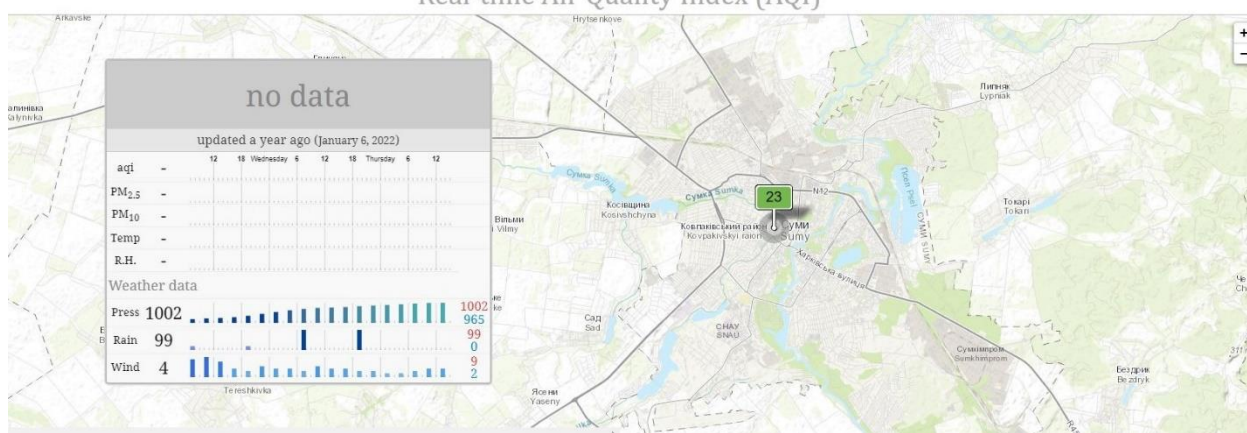


Рисунок 1.12 – Робота станцій контролю повітря м. Київ та м. Суми

В залежності від концентрації  $PM_{2.5}$  ( $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ ) у повітрі визначають індекс якості повітря (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Залежність індексу якості повітря від концентрації  $PM_{2.5}$

Індекс якості повітря	$PM_{2.5}$ , $\mu\text{кг}/\text{м}^3$
Добрий	0
Задовільний	12
Шкідливий для групи ризику	35
Шкідливий	55
Дуже шкідливий	150
Небезпечний	250

Незважаючи на те, що методи виявлення аерозольних часток в повітрі дозволяють оцінювати якість і кількість таких часток, вони не є ефективним засобом для зменшення кількості аерозольних викидів в атмосферу. Тому, для розуміння напрямків зниження негативного впливу на довкілля від аерозолів, проведемо їх класифікацію.

### **1.5.2 Класифікація аерозолів**

Питанням класифікації аерозольних частинок і методам їх визначення присвячені роботи [98-104], які містять схожий підхід до їх класифікації але є роботи [105-111], які мають більш вузьку специфіку дослідження класифікації аерозолів.

Розглянемо більш детально існуючу класифікацію аерозолів антропогенного походження.

#### **За характером утворення**

За характером утворення аерозолі можна класифікувати на: диспергаційні, конденсаційні і змішані.

Диспергаційні аерозолі це суспензії твердих частинок або рідинних краплин в газоподібній речовині, яка може бути повітрям або іншим газом. Ці аерозолі утворюються під час розприскування рідин (водяні тумани, розпилювання рідкого палива в енергетичних установках, руйнування струменів рідини під впливом поля електричного потенціалу тощо) та під час подрібнення твердих речовин (пил технологічних процесів пересипання порошкоподібних речовин, шліфування твердих матеріалів та інше) [101]. Такі аерозолі можуть мати значний вплив на якість повітря, здоров'я людей та навколишнє середовище

Конденсаційні аерозолі – це аерозолі, які утворюються внаслідок охолодження і утворення перенасиченої пари, частинки якого добре конденсуються на ядрах конденсації, а також в результаті хімічних реакцій між двома або більше речовинами (коли утворюється нова речовина з меншою

пружністю пари). Цей механізм утворення аерозолів пов'язаний з утворенням у гомогенній системі нової фази і може відбуватися у трьох випадках:

- 1) під час адіабатичного розширення;
- 2) під час змішування парів і газів з різними температурами;
- 3) під час охолодження газової суміші.

Крім того, конденсаційні аерозолі можуть утворюватися в результаті газових реакцій, які призводять до утворення нелетких речовин (дим під час згоряння палива, смог в атмосфері, випаровування речовин з подальшою конденсацією пари).

Найбільш поширеними [105] є змішані аерозолі (рис. 1.13).

Дисперсна фаза у змішаних аерозолях містить частинки, що утворилися як в результаті подрібнення так і конденсації (викиди металургійних підприємств і теплових електростанцій, пірометалургійні та зварювальні процеси).

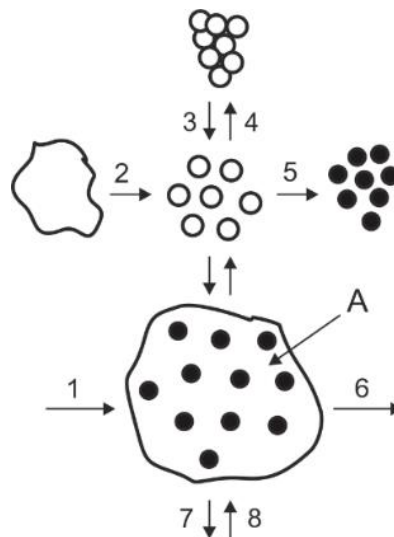


Рисунок 1.13 – Існування аерозольної системи: А – аерозоль, 1,6 – переміщення аерозольних частинок; 2, 5 – утворення аерозольних частинок диспергуванням і конденсацією; 3, 4 – агрегація (коагуляція) і подрібнення частинок дисперсної фази; 7, 8 – відтік і притік частинок

Характер утворення аерозолів дозволяє говорити більше про місце реалізації природозахисних технологій ніж про вибір того чи іншого обладнання.

### **Класифікація аерозолів за дисперсністю**

В залежності від розміру частинок аерозолі можна виділити наступні види:

- пил ( $d_p > 10$  мкм);
- тумани ( $10 > d_p > 0,1$  мкм);
- дим ( $0,1 > d_p > 0,001$  мкм).

Пил складається із механічних частинок, що диспергувалися в результаті подрібнення твердих речовин або висиханні крапель з розчиненими речовинами або частинками. Хімічний склад частинок пилу різний [107].

Тумани складаються із крапель рідини, що утворюються під час конденсації пари або розпилюванні рідин. До таких видів аерозолів також враховуються краплі із розчиненими речовинами або з частинками всередині [112, 113].

Дим утворюється під час горіння і підйому летючих речовин, а також в результаті хімічних і фотохімічних реакцій (котельні ТЕЦ, пожежі) [114]. Іноді дим може містити крупні частинки не повністю спалених речовин, золу, оксиди металів, смоли, тому розмір димових частинок коливається у широкому діапазоні – від субмікронних (0,01 мкм) до мікроскопічних (100 мкм).

Частинки диму, що мають високу дисперсність, на відміну від пилу (більш грубодисперсний), практично не осаджуються під дією сили тяжіння [115]. Це у свою чергу ускладнює задачу їх уловлення під час утворення і впливає на екологічну складову впливу на довкілля різних виробничих процесів.

А практиці зазвичай дисперсний склад аерозолі характеризують розподілом частинок за розмірами у вигляді кількісної або масової



концентрації. Типові розміри частинок деяких аерозолів наведені у таблиці 1.4 [99].

Таблиця 1.4 – Розміри деяких частинок аерозолів

Тип аерозолю	Діаметр, мкм
Туман сірчаної кислоти	0,3 – 0,5
Топковий дим	0,1 – 10,0
Атмосферний туман	2,0 – 50,0
Біогенний пилок	15,0 – 20,0

Мінімальний розмір частинок аерозолю визначається можливістю існування в агрегатному стані (найменша частинка твердої речовини або рідини не може мати розмір менше 0,001 мкм). Верхня межа визначається розміром, який не дозволяє тривалий час знаходитись у зваженому стані у повітрі (близько 100 мкм) [115].

За типом походження і розмірами аерозолі можна поділити на дві групи: макро- і мікрочастинки [116]. Мікрочастинки ( $d_p < 0,5 - 1,0$  мкм) утворюються в процесах конденсації і коагуляції, макрочастинки – виникають під час дезінтеграції з поверхні Землі.

Розмір частинок визначає здатність аерозолю проникати у дихальні шляхи. Так, мікрочастинки (респірабельні фракції до 10 мкм) здатні потрапляти в альвеоли і затримуватися в них. Частинок розміром 10 мкм і більше затримуються у верхніх дихальних шляхах і бронхах [99].

Таким чином, розсіювання аерозольних частинок у повітрі в значній мірі визначається дисперсним складом твердих частинок, а найважливіше питання пиловловлення – підбір пиловловлюючого обладнання – визначається на підставі дисперсного складу викиду.

### Класифікація аерозолів за агрегатним станом дисперсної фази

За агрегатним станом класифікацію аерозолів представлено у таблиці 1.5 [103]. Найбільш розповсюдженими є аерозолі з дисперсною фазою лише із твердих частинок (Т/Г) (дим, пил) або із крапель (Р/Г) (тумани).

Таблиця 1.5 – Класифікація аерозолу в залежності від агрегатного стану дисперсної фази

Дисперсна фаза	Позначення	Назва
Тверда	Т/Г	Дим, пил
Рідка	Р/Г	Туман, краплі
Тверда і рідка	Т, Р/Г	Смог
Піноподібна	Р, Г/Г	Рідка аерозольна піна (вогнегасник)
	Т, Г/Г	Тверда аерозольна піна (попіл і вулканічна лава)
Газові утворення	Г/Г	Клатрати, газові гідрати

Агрегатний стан є суттєвим фактором для вибору технологічних рішень уловлення аерозольних викидів, обладнання повинно ефективно працювати з різними дисперсними фазами і може бути представлене апаратами для комплексного очищення пилогазових викидів.

### Класифікація аерозолів за морфологічними ознаками частинок

Існує класифікація згідно морфологічних ознак частинок: щільність, форма, структура, хімічний склад [117, 118].

Частинки аерозолу можуть бути різної форми, в залежності від якої їх поділяють на три основні класи (рис. 1.14).

Більшість наукових уявлень про поведінку аерозолів відноситься до ізометричних частинок (оптика аерозолів, рух двофазних середовищ та інше) [104, 118].

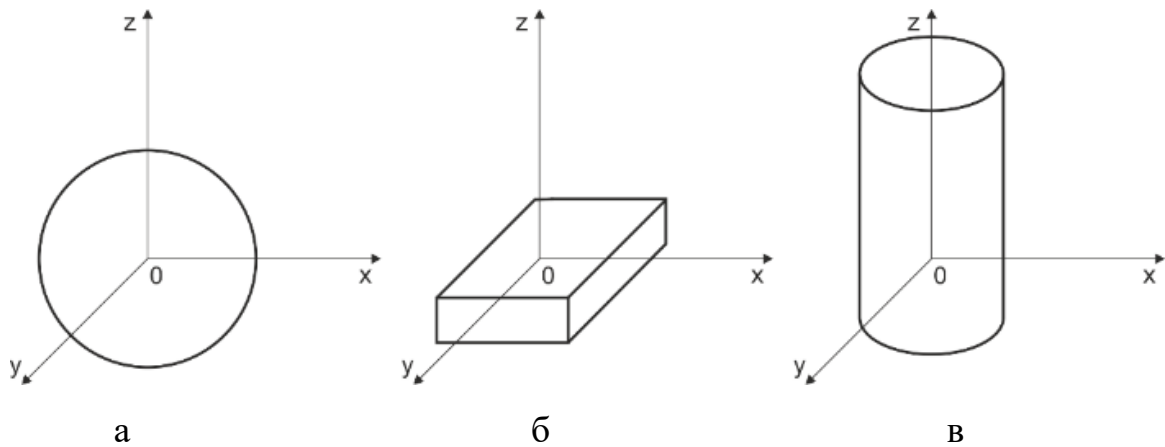


Рисунок 1.14 – Основні форми частинок аерозолів:  
а – ізометрична частинка; б – пластинка; в - волокно

Форму пластинок зазвичай мають частинки пилу, як і більшість твердих аерозольних частинок, що мають неправильну форму, до яких застосовується поняття – певний середній розмір (за об’ємом або за площею проекції).

Волокна (мають протяжність в одному напрямі) – призми, голки, нитки або мінеральні волокна (азбест). Наукові дані по цій формі аерозолів суттєво обмежені у порівнянні з ізометричними частинками.

Форма частинок залежить від їх фазового стану і механізму утворення. Рідкі аерозолі, як правило, мають сферичну форму, тверді – неправильну.

Хімічний склад частинок аерозолію може бути найрізноманітнішим і визначається вихідним матеріалом і способом їх утворення. Основними хімічними складовими аерозольних часток є неорганічні іони  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$  та  $\text{NH}_4^+$ , мінерали, сіль, органічні вуглеводні і елементарний вуглець. Розповсюджені також композитні частинки, які складаються з кількох хімічних речовин [117].

### **Класифікація аерозолів за морфологічними ознаками частинок**

В залежності від концентрації частинок аерозолі поділяються на висококонцентровані і розріджені. Критерієм даної класифікації є об’ємна концентрація частинок [103]:

$$C_v = \frac{V_u}{V}, \quad (1.1)$$

де  $V_u$  – об'єм, що займають частинки в аерозольній системі;

$V$  – загальний об'єм аерозольної системи.

За умови, коли  $C_v > 0,1$  система називається високонцентрованою, при  $C_v < 0,1$  – розрідженою. Як приклад, у безвітряну ясну погоду за містом в 1 л повітря міститься декілька десятків тисяч частинок загальною масою менше  $10^{-7}$  г, а у шахті поблизу працюючого бурового обладнання – мільярди частинок масою у кілька десятків мг ( $10^{-2}$  г) [119].

Таким чином, технологічні рішення для уловлення аерозолію повинні забезпечувати достатню поверхню контакту фаз і час протікання можливих хімічних реакцій в апараті навіть за високих концентрацій аерозольних викидів.

### **Класифікація аерозолів за характером впливу на людину**

Населення сучасних міст має підвищений ризик розвитку як канцерогенних, так і не канцерогенних ефектів від забруднення атмосферного повітря.

Особливо розповсюдженими захворюваннями є токсичні отруєння плумбумом, кадмієм, алюмінієм, берилієм та їхніми сполуками, а також спалах інфекційних захворювань у людей, що мали тривалий контакт із пилом вольфраму, ванадію, титану й ряду шлаків металургійних виробництв. Багато видів пилу антропогенного походження є причинами алергічних захворювань. При цьому алергеном може бути пил як мінерального, так і органічного походження [120].

За даними ВООЗ, вплив аерозолію на організм людини обумовлений як короткочасною (протягом годин або днів), так і довготривалою (протягом місяців або років) експозицією і включає [121]:

– респіраторну і серцево-судинну захворюваність (загострення астми і респіраторних симптомів і зростання числа випадків смерті під час госпіталізації;

– смертність від серцево-судинних, респіраторних захворювань і від раку легень.

За характером впливу на організм людини аерозоль має дратівливу і токсичну дію [99].

Аерозолі, які мають дратівливу дію на організм людини:

- мінеральний пил (процесів шліфування, розмелу, транспортування);
- металеві частинки (механічна обробка металів);
- деревний пил (обробка деревини);
- полімерні частинки (процеси переробки полімерів).

Аерозолі токсичної дії викликають отруйний вплив на людину під час дихання, ковтання і осадження на поверхню шкіри (діє як рідка отрута). Тому, вибір ефективних природоохоронних рішень з високими показниками ефективності роботи залишається актуальною задачею.

До показників, які широко використовуються для характеристики аерозолів і мають значення для здоров'я людини, відносяться масова концентрація частинок діаметром  $d_{ch} < 10$  мкм ( $PM_{10}$ ) і частинок діаметром  $d_{ch} < 2,5$  мкм ( $PM_{2,5}$ ). На більшості територій північної півкулі  $PM_{2,5}$  складають 50-70%  $PM_{10}$  [39].

### **Уточнення класифікацій**

Існуючі класифікації аерозолів в повній мірі не дозволяють реалізувати підходи до забезпечення технологічних рішень для підвищення рівня екологічної безпеки на рівні підприємств та регіонів в цілому.

Тому, для більш раціонального вибору технологічних рішень щодо зменшення впливу аерозольних викидів на довкілля, що неповністю враховується вищезазначеною класифікацією аерозольних домішок, пропонуємо враховувати додаткову класифікацію аерозолів - за фізико-хімічними властивостями. Було розглянуто найбільш вагомими фізико-хімічні

характеристики як злипливість часток, гігроскопічність та здатність сорбувати додаткові речовини з зовнішнього середовища, що у свою чергу є вагомим фактором під час вибору технологічних природозахисних рішень.

Стабільна робота пилоочисного обладнання суттєво залежить від здатності частинок до злипання, так як підвищена здатність до злипання може призвести до часткового або повного забивання обладнання. Аерозолі, у яких понад 70% частинок мають розмір менше 10 мкм, ведуть себе як дуже здатні до злипання [122]. Здатність частинок до злипання оцінюють за величиною розривної міцності, що дозволяє розділити пиловидні матеріали на 4-и групи (табл. 1.4).

Здатність пилових частинок поглинати вологу з навколишнього середовища до рівноважного стану з оточуючим газовим середовищем називається гігроскопічністю, що залежить від хімічного складу, нерівностей поверхні частинок, їх розміру і форми. Гігроскопічність впливає на такі властивості частинок, як електропровідність або злипання.

Таблиця 1.6 – Злипання деяких частинок дрібнодисперсного пилу

Група злипання	Розривна міцність шару частинок (Р, Па)	Приклад частинок
I група - незлипливі	< 60	Шлак, глинозем, доломіт
II група - слабкозлипливі	60 - 300	Кокс, апатит, доменний пил
III група - середньозлипливі	300 - 600	Сухий цемент, сажа, залізний колчедан і пил з $d_{ч\ max} = 25$ мкм
IV група - сильнозлипливі	> 600	Гіпс, вологий цемент, алебастр, бавовна і пил з $d_{ч\ max} = 10$ мкм

За здатністю до змочування частинки діляться на:

- добре змочувані – гідрофільні (краще вловлюються в мокрих пиловловлювачах);
- погано змочувані – гідрофобні.

Змочування впливає на гідропиловидалення та ряд інших важливих процесів [98].

Серед фізико-хімічних властивостей аерозолів також можна розглядати їх здатність до поглинання (сорбція) компонентів зовнішнього середовища. Будь-які за агрегатним станом аерозолі можуть виконувати функцію сорбентів, тобто поглинати за рахунок мікропористої структури поверхні чи хімічних реакцій інші речовини з середовища в якому вони перебувають. Здатність аерозолів вступати в хімічну реакцію часто залежить від температури, що свідчить про наявність активізаційного бар'єра. Суттєве обмеження даного процесу, окрім температурного фактора, полягає у часі контакту газового потоку з сорбентом в апараті для повноти протікання хімічної реакції.

Це у свою чергу може вплинути на правильний вибір необхідного пилоочисного обладнання, а також суттєво збільшує потенційну небезпеку за рахунок поглинання аерозолями супутніх високотоксичних забрудників з середовища протікання процесу сорбції.

Таким чином, на підставі наведеної класифікації аерозолів, необхідно відзначити, що розмір частинок аерозолі є одним із основних характеристик, що визначає вибір типу апарата або системи апаратів для очищення газу. Також, саме розуміння фізико-хімічних властивостей аерозолі дозволяє оптимально підібрати необхідне пилогазоочисне обладнання, яке б дозволило реалізувати не тільки швидкі в часі фізичні механізми уловлення дисперсних часток, а і підібрати потрібну конструкцію для достатності часу протікання хімічної реакції (тривалість контакту фаз) під час взаємодії дисперсної фази з поглинальним середовищем. Крупні частинки легше осідають із газового потоку і можуть уловлюватися в апаратах найпростішого типу. Для очищення газу від дрібнодисперсних аерозолів (дим, туман), а також, який може містити різноманітні домішки (смоли, легкозлипливі речовини), зазвичай потрібно не один, а декілька типів апаратів, встановлених паралельно за рухом газової суміші.

Необхідним стимулом інноваційних процесів є прийняття державних стандартів екологічного управління та керування [123, 124]. Орієнтація промислового виробництва на виконання вимог цих стандартів дозволяє оптимізувати та стабілізувати роботу основного технологічного обладнання, сприяє технічному переоснащенню промислових підприємств, удосконаленню систем газоочищення, що призводить до дотримання нормативів викидів забруднюючих газів. Тому, задача підбору високоефективного і надійного обладнання, здатного вловлювати дрібнодисперсні частинки з різноманітними фізичними та фізико-хімічними параметрами, є достатньо актуальною [125–130].

### **1.6 Вплив аерозольних викидів на середовище життєдіяльності людини**

Забруднення атмосферного повітря за ступенем хімічної небезпеки для людини посідає перше місце. Це зумовлено в першу чергу тим, що забруднюючі речовини з атмосферного повітря мають найбільше поширення та випадають на ґрунт та водне середовище [131-136].

У структурі професійної захворюваності перше місце (50-60%) належить хворобам органів дихання (силікоз та інші форми пневмоконіозів, хронічні бронхіти) [137-149]. Запилене повітря промислових міст наносить велику шкоду населенню, тому ослаблює імунну й захисну системи організму, особливо великої небезпеки зазнають люди, що страждають хворобами дихальних шляхів, астмою й різними видами алергії. Так, в [150] виявлена чітка залежність між рівнем захворюваності гострими пневмоніями, ларинготрахеїтами, бронхітами і ступенем забруднення навколишнього середовища в різних районах промислових центрів з розвинутим виробництвом. Поширеність бронхіальної астми у дітей в одному з таких міст [151] складала 9,7 на 1000 чоловік населення.



При визначенні ступеня техногенного навантаження на регіональні екосистеми особлива увага приділяється хімічним чинникам забруднення навколишнього природного середовища, як визначальним у формуванні зон екологічного неблагополуччя [152-154].

Наслідок тривалого шкідливого впливу забруднюючих речовин на організм людини негативно відображається на його імунній стійкості. Значно менше уваги приділяється аерозольному забрудненню атмосфери але вплив механічних домішок також наносить шкоди здоров'ю людини та довкіллю у цілому (рис. 1.15).

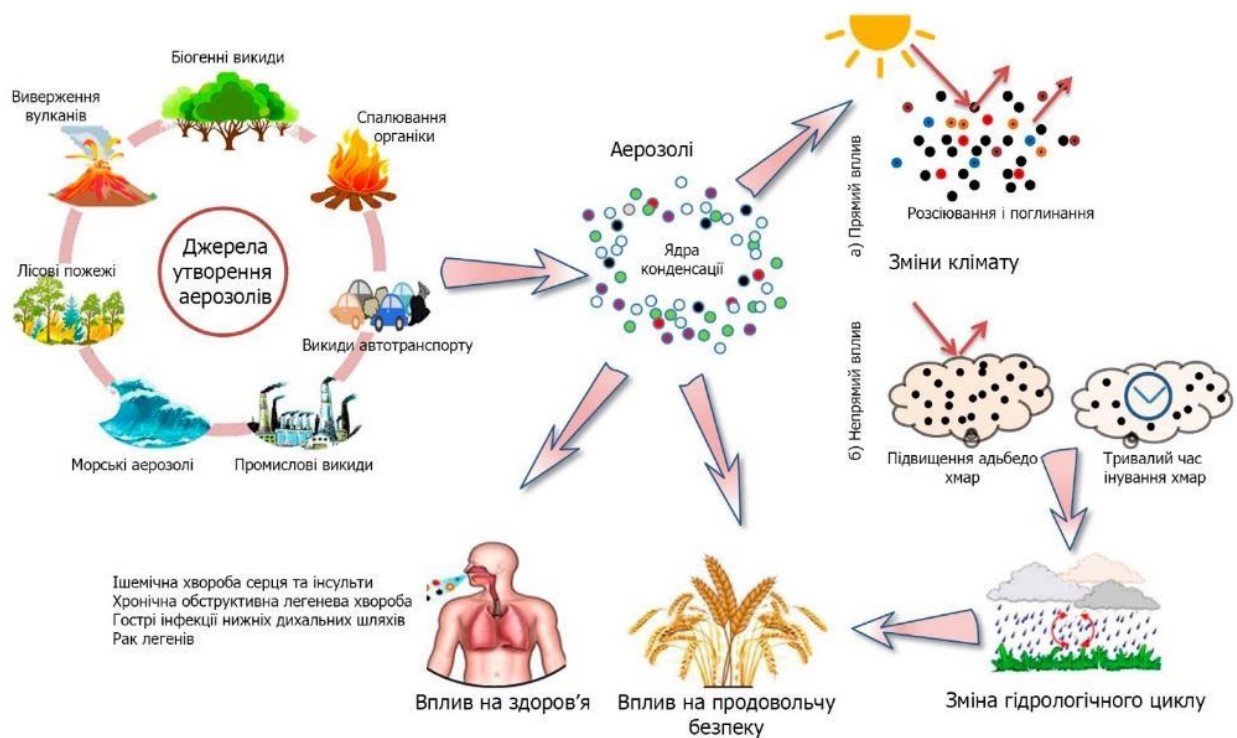


Рисунок 1.15 – Взаємозв'язок аерозольних викидів із кліматом, здоров'ям людини та продовольчою безпекою.

Тонкодисперсні тверді частки (розмір менше 2,5 мкм) мають час перебування в нижніх шарах атмосфери 10-20 діб, що достатньо для їхнього поширення на велику відстань від джерел утворення. При цьому за рахунок переміщень повітряних потоків вони можуть проникати у верхні шари

тропосфери й з них – у стратосферу. Атмосферні аерозолі послабляють сонячне випромінювання в результаті розсіювання, відбиття й поглинання променистої енергії. При досить тривалому збереженні інтенсивних забруднень атмосфери це приводить до зниження температур і локальним змінам кліматичних умов, що найбільше помітно у великих містах і промислових центрах. Вирішення проблеми подальшої зміни клімату полягає у збереженні природи та вирішенні проблеми безвідходного виробництва, тоді зміни клімату будуть відбуватись за природними процесами.

Аерозолі відіграють помітну негативну роль у процесах корозії металевих і силікатних матеріалів через утворення на поверхнях відкладень. Дрібнодисперсні зважені речовини адсорбують з повітря сульфати й інші кислі домішки, що втримують вологу, у якій можуть розчинятися кислотні гази. Кислоти, що утворилися, містяться у відкладеннях, руйнують вироби з каменю, скла, металів.

Аерозольні забруднення атмосфери впливають на здоров'я людини, стан флори й фауни. Зниження потоку сонячного випромінювання зменшує утворення (дією УФ-променів) вітаміну D<sub>3</sub>, недолік якого негативно позначається на формуванні кісткових тканин, обумовлюючи захворювання рахітом. УФ-промені знищують деякі мікроорганізми, виконуючи стерилізуючу дію. Недостатність УФ-променів підвищує ризик інфекційних бактеріальних захворювань у рослин і тварин.

Розмір часток, як важливий фактор, визначає ступінь та інтенсивність їх впливу на здоров'я поряд з хімічним складом і формою [155–158]. Світова спільнота у вересні 2021 року [2] погодилась, що визначальним фактором, який впливає на рівень безпечної життєдіяльності людини є тверді частинки розміром рівні або менші за 2,5 мкм у діаметрі (PM<sub>2,5</sub>). Вони здатні проникати глибоко в легені, PM<sub>2,5</sub> може навіть потрапити в кров і викликати серцево-судинні та дихальні порушення, а також вплинути на інші органи. У 2013 році Міжнародним агентством ВООЗ із дослідження раку (IARC) забруднення зовнішнього повітря та тверді частинки були класифіковані як канцерогенні.

Наявні в природному атмосферному фоні з часів зародження людства на планеті мінеральні завислі речовини, вулканічний пил та ін. можуть викликати специфічні респіраторні захворювання, наприклад, пневмоконіози [159]. Дана група респіраторних захворювань пов'язана з накопиченням дрібнодисперсного пилу в легенях і реакцією легеневої тканини на його присутність [160, 161]. У наші дні подібні захворювання пов'язані, в основному, з впливом мінеральних суспензій, що мають важливе промислове значення – азбестом, вугіллям і кремнеземом. Пневмоконіози, викликані кварцовим пилом ( $\text{SiO}_2$ ), називають силікоз, силікатами (кремнієвої кислотою) – силікатози, вугільним пилом - сидероз, азбестового – асбестозом, алюмінієвим – алюміноз і т.д. [162, 163].

Існує статистично встановлений зв'язок між забрудненням атмосферного повітря і загальною захворюваністю населення [164]. Згідно з публікаціями [165–167], внесок забруднення повітря в частоту і вираженість найбільш поширених захворювань системи органів дихання, травлення, шкіри, алергічних реакцій та інше становить до 30% від загальної суми факторів, що впливають на здоров'я.

У число захворювань, пов'язаних з забрудненням атмосферного повітря також входять серцево-судинні захворювання, вроджені вади, порушення нервово-психічного розвитку дітей, злоякісні новоутворення (рак легень, молочної залози, щитовидної залози) і багато інших змін стану здоров'я, пов'язаних з генетичними, імунологічними, інфекційними та іншими факторами [168-170]. Особливість впливу забруднення атмосферного повітря на людину полягає в тому, що одні забруднюючі речовини одразу впливають на організм людини, а інші – лише через певний час.

Вплив на здоров'я людини  $\text{PM}_{2,5}$  обумовлено вмістом респірабельних частинок, які мають настільки малий діаметр, що можуть проникати в торакальний відділ дихальної системи. Вплив респірабельних  $\text{PM}_{2,5}$  частинок, обумовлений як короткочасною (протягом годин або днів), так і довготривалою (протягом місяців або років) експозицією і включає:

респіраторну і серцево - судинну захворюваність, загострення астми і зростання числа випадків госпіталізації; смертність від серцево - судинних і респіраторних захворювань, раку легень.

Наслідки впливу небезпечних для здоров'я людини  $PM_{2,5}$  під час короткочасного впливу полягають у виникненні астми, бронхітів, інфекції дихальних шляхів, ішемічної хвороби серця та ін.; при тривалому впливі – хронічних бронхітів, алергії, закупорки судин, зниження рівня і тривалості життя.

Аналіз екологічних ризиків від забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом корелюється з показниками здоров'я населення в Україні та інших країнах. Одним із таких показників є показник втрат років життя на 1000 осіб населення країни у зв'язку з хворобою, інвалідністю та передчасною смертю (DALY), що пов'язані з викидами зважених речовин в атмосферу (рис. 1.16).

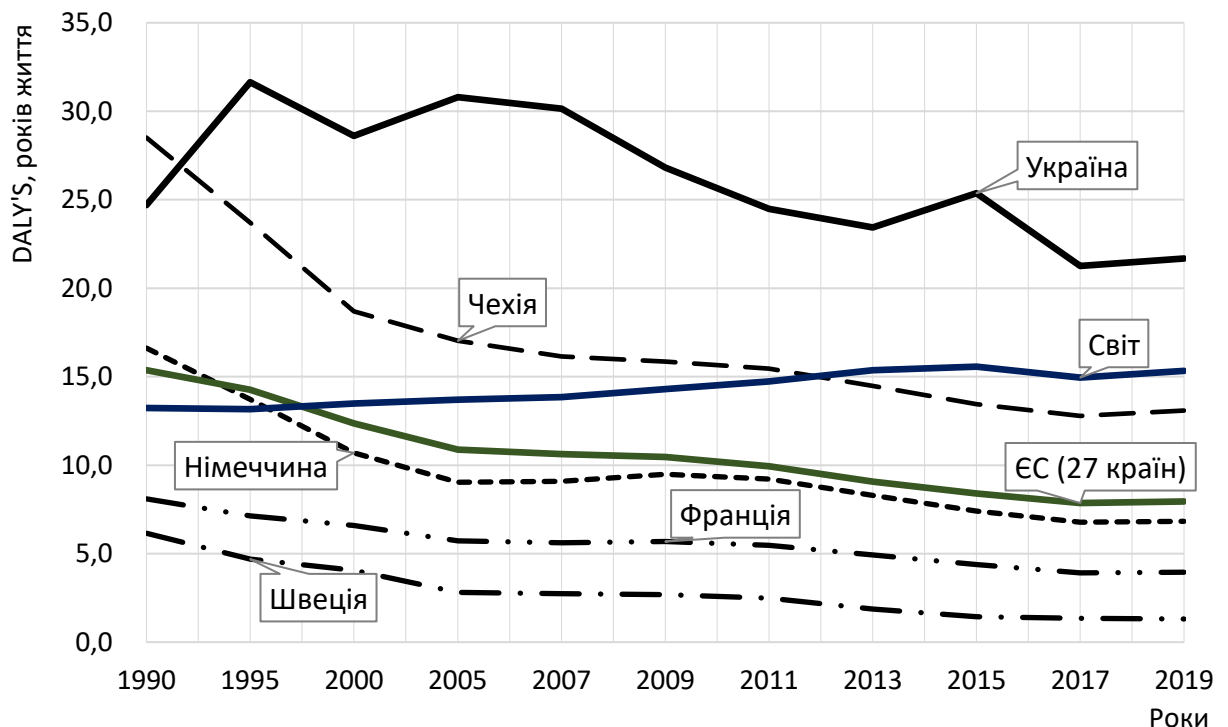


Рисунок 1.16 – Динаміка втрат років життя на 1000 осіб (DALY) у зв'язку з хворобою, інвалідністю та передчасною смертю, що пов'язані з викидами дрібнодисперсних зважених речовин в атмосферу

Чим вищий показник, тим вищий рівень втрат життя в національному масштабі, що може свідчити про недостатню доступність та якість медичної допомоги, погані умови життя та інші соціально-економічні чинники, які впливають на здоров'я населення. DALY є корисним для оцінки ефективності різних стратегій і програм з покращення охорони здоров'я та профілактики захворювань.

Максимальне значення DALY для України припадало на 1995 рік і становило 32 роки на 1000 осіб. Незначне зниження показника для України, на жаль, не дозволяє досягнути значень європейських країн.

Інший показник забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом представлений відсотком передчасних смертей, пов'язаних з викидами зважених речовин в атмосферу, від загальної кількості випадків передчасної смерті населення (рис. 1.17).

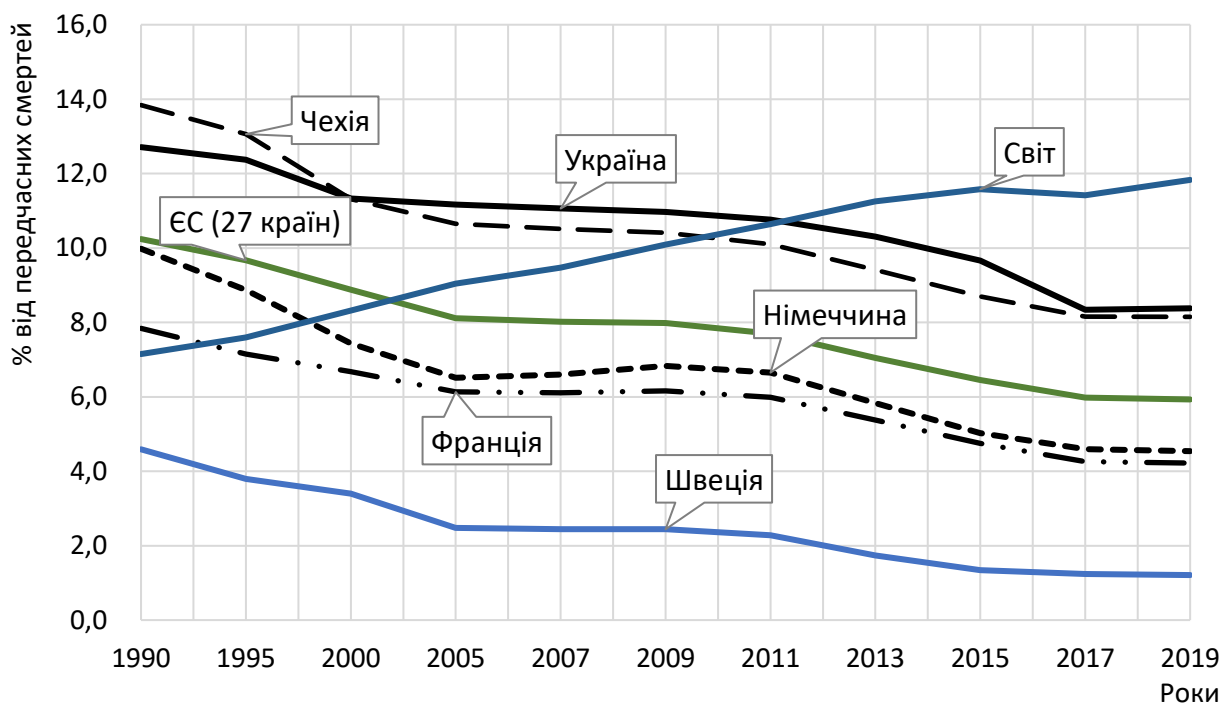


Рисунок 1.17 – Передчасна смертність населення, яка пов'язана з викидами дрібнодисперсних зважених речовин в атмосферу, % від загальної кількості випадків передчасної смерті населення

Як бачимо на рис. 1.17 Україна має позитивну динаміку передчасної смертності населення у порівнянні із загальною картиною, пов'язаною із забрудненням атмосферного повітря дрібнодисперсними частками у різних країнах світу. У 2016 році в Україні було понад 26 тисяч передчасних смертей від забруднення повітря. Причиною цього є переважно промисловість, транспорт та побутові джерела забруднення.

За даними OECD (табл. 1.1) з використанням вбудованих функцій програмного продукту MS Excel отримано прогнозну модель викидів дрібнодисперсних зважених речовин ( $PM_{2.5}$  і менше) в Україні до 2030 року (рис. 1.18).



Рисунок 1.18 – Прогноз викидів  $PM_{2.5}$  в Україні

За прогнозованим сценарієм (ураховували 4 сезони року, інтерполяцію даних за попередні роки та довірчий інтервал 95%) Україна може досягти поставленої мети у зниженні викидів дрібнодисперсних зважених речовин на 22,5 % від обсягу викидів у 2015 році [171], але не все залежить від обсягів викидів.

Концентрація зважених речовин у повітрі – важлива екологічна характеристика, що дозволяє оцінити якість атмосферного повітря.

Забруднення повітря шкодить здоров'ю людей навіть у менших концентраціях, ніж вважалося раніше. За останні 15 років з'явилося більше доказів, які свідчать про негативний вплив зважених речовин атмосферного повітря на різні аспекти здоров'я людини (спричиняє 7 мільйонів передчасних смертей), тому, ВООЗ оновила АQG у бік зниження максимально допустимої концентрації шкідливих речовин у повітрі [2].

Таким чином, аналіз даних по впливу дрібнодисперсних завислих речовин в атмосферному повітрі на людину дозволяє зробити висновок про те, що тверді частинки становлять значну небезпеку в залежності від їх розміру, морфометричних і фізико-хімічних характеристик. У першу чергу уражаються органи дихання людей, які проживають поблизу промислових підприємств, поруч з автомагістралями, шкідливими виробництвами.

На підставі аналітичного дослідження є необхідність оцінювати структуру і склад дрібнодисперсних частинок в атмосферному повітрі, не зважаючи на розмір населеного пункту і кількість жителів у ньому. Одним із напрямів зниження впливу забрудненого повітря на здоров'я населення будь-якого міста, які набувають особливого значення, включають:

– нормативно-структурні зміни (зменшення споживання енергії, особливо енергії, що виробляється шляхом спалювання палива; оптимізації основних виробничих процесів об'єктів промисловості, комунальних підприємств, плануванні землекористування; модернізації газоочисного обладнання виробничих об'єктів; зміна способів пересування (екологізація транспорту)).

– законодавче регулювання (більш жорсткі нормативи якості повітря, обмеження гранично допустимих викидів різних джерел);

– зміни в поведінці на індивідуальному рівні (використанні екологічно чистих способів пересування, екологізації побутових джерел енергії).

Важливим резервом поліпшення здоров'я населення є поліпшення якості атмосферного повітря [71]. Це вимагає проведення управлінських заходів по підвищенню рівня екологічної безпеки.

Управління якістю атмосферного повітря включає заходи щодо поліпшення його стану повітря в містах та при реконструкції або перепрофілізації промислових підприємств. Базисом для прийняття управлінських рішень є медико-гігієнічне нормування вмісту забруднюючих речовин, прогнозування розсіювання забруднюючих речовин, розробка природоохоронних рішень. Тому, підвищення рівня екологічної безпеки від промислових викидів  $PM_{2.5}$  передбачає комплексний підхід до проблем охорони довкілля та здоров'я людей. Потрібно ретельно вивчати вплив викидів на довкілля, встановлювати ефективні системи контролю та очищення, ефективно та раціонально використовувати ресурси, співпрацювати з громадськістю та органами влади.

### **1.7 Моделювання поширення домішок в атмосфері**

В загальній системі моніторингу забруднення навколишнього середовища важливу роль відіграє дослідження атмосферних забруднень [172, 173], оскільки через атмосферу відбувається забруднення усіх компонент природного середовища. Процеси, які відбуваються в атмосфері, найбільш складно піддаються контролю, прогнозуванню і керуванню, що суттєво ускладнює проведення природоохоронних заходів. В урбанізованих територіях населених пунктів найбільш небезпечними джерелами забруднення атмосфери є викиди енергетичних і промислових підприємств, викиди від автотранспорту.

Згідно аналізу статистичних баз даних [36, 37], близько 1/3 захворювань, що спричинені екологічними факторами, пов'язані з забрудненням атмосферного повітря. Складна екологічна ситуація більшості міст світу вимагає реалізації низки природоохоронних заходів. Доцільність і ефективність таких заходів залежить від якості інформації про стан навколишнього середовища, яка може бути підготовлена під час моделювання



і прогнозування процесів поширення забруднюючих речовин від потенційно-небезпечних об'єктів.

При прогнозуванні впливу промислових підприємств на атмосферне повітря використовують математичне моделювання розсіювання забруднюючих речовин.

Розробці математичних моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері присвячені роботи вітчизняних та зарубіжних фахівців [174-190]. Для прогнозування забруднення повітря використовуються різноманітні методи та математичні моделі розповсюдження забруднюючих речовин від їхніх джерел, які враховують закономірності просторовочасової динаміки розподілу концентрації домішок. У них описуються розповсюдження домішок в атмосфері з різними параметрами атмосфери, що впливають на перенесення домішок у повітрі, але немає єдиного підходу до класифікації математичних моделей.

На теперішній час існує велика кількість методів, що реалізують різноманітні підходи до моделювання процесу поширення домішок в атмосфері. Для застосування моделей треба володіти метеорологічною і географічною інформацією, а також даними про джерело забруднення і викиди. Майже всі моделі розсіювання описують процеси турбулентної дифузії в атмосфері і більшість їх можна класифікувати як гаусівські [191-224], лагранжеві [225-238] та ейлерові [239-249].

Алгоритм Гаусівської моделі є найбільш розповсюдженим в моделюванні аналізу повітряної дисперсії [185]. Він ґрунтується на припущенні, що забруднююча речовина буде розповсюджуватись відповідно до нормального статистичного розподілу. Загальне Гаусівське рівняння

$$\frac{dC}{dt} + U \frac{dC}{dx} = \frac{d}{dy} \left( K_y \frac{dC}{dy} \right) + \left( K_z \frac{dC}{dz} \right) + S \quad (1.2)$$

де  $x$  – виміряна координата від джерела вздовж напрямку вітру;

- $y$  – виміряна координата від джерела перпендикулярно напрямку вітру;  
 $z$  – вертикальна координата, що відраховується від поверхні ґрунту;  
 $C(x, y, z)$  – середня концентрація дисперсної речовини при  $(x, y, z)$  точки;  
 $K_y, K_z$  – розповсюдження турбулентності за напрямками вісі  $y$  і  $z$ ;  
 $U$  – середня швидкість вітру вздовж вісі  $x$ .

Математичні моделі гаусівського типу широко використовуються для вирішення природоохоронних задач різних масштабів, мають ряд переваг та недоліків. В основному, такі моделі знайшли використання для прогнозування поширення забруднюючих речовин від стаціонарних джерел викидів.

При реалізації моделі можуть бути зроблені деякі припущення:

- концентрація забруднюючих речовин не впливає на розріджений потік (пасивна дисперсія);
- молекулярна дифузія і дифузія вздовж напрямку вітру незначні;
- турбулентні потоки лінійні;
- бічна середня і вертикальна швидкість вітру дорівнює нулю, ідеальний випадок плоскої поверхні.

Гаусівська модель частіше використовується для прогнозу дисперсії безперервних викидів від поверхні землі або наземних джерел (рис. 1.19).

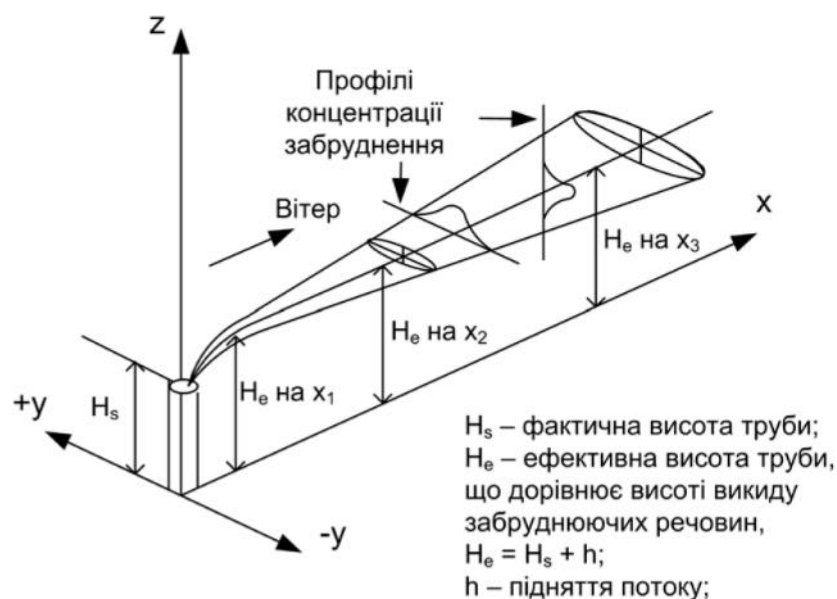


Рисунок 1.19 – Модель Гаусівського факелу

Модель Ейлера [180] розв'язує рівняння збереження маси для даного забруднювача. Загальне рівняння виглядає наступним чином

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c_i)}{\partial t} &= -\bar{U}\nabla(c_i) - \nabla(c_i^r) + D\nabla^2\langle c_i \rangle + \langle S_i \rangle, \\ U &= \bar{U} + U^r, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де  $U$  – головний вектор вітру  $U(x, y, z)$ ;

$\bar{U}$  – середній вектор області вітру;

$U^r$  – вектор коливань області вітру;

$C$  – концентрація забруднюючої речовини;

$\langle c \rangle$  – середня концентрація забруднюючої речовини;

$c^r$  – концентрація забруднюючої речовини в коливанні;

$D$  – молекулярний коефіцієнт дифузії;  $S_i$  – початковий елемент.

Модель Ейлера використовує фіксовану решітку (вертикальну і горизонтальну) і розв'язує відповідні хімічні рівняння одночасно в усіх елементах решітки, при цьому враховуючи обмін забруднюючими речовинами між елементами.

Алгоритм моделі Лагранжа [181] прогнозує дисперсію забруднюючої речовини, якщо відомі зміни базової решітки. Ця зміна базової решітки в цілому залежить від того, що напрямок вітру або вектор поля вітру потрапляє на напрямок забруднюючої області. Модель Лагранжа може бути представлена наступним чином

$$\langle c(r, t) \rangle \geq \iint p(r, t \| r', t') S(r', t') dr' dt', \quad (1.4)$$

де  $\langle c(r, t) \rangle$  – середня концентрація забруднюючої речовини в місці  $r$  і момент часу  $t$ ;

$S(r', t')$  – визначає джерело викиду;

$p(r, t \| r', t')$  – функція ймовірності переходу від місця  $r$  в момент часу  $t$  до місця  $r'$  в момент часу  $t'$ .

Ймовірнісна функція повинна бути визначена як функція повних метеорологічних даних біля джерела. Якщо джерело викиду містить механічний пил, то це повинно бути додано в якості розподілу міри і щільності часток. Модель Лагранжа описує перенос окремих повітряних потоків за певний період часу під впливом атмосферних полів і розповсюдження домішок забруднюючих речовин. Цей підхід дає ефективну в розрахунковому плані систему, однак дуже важко належним чином охарактеризувати взаємодію газопилового потоку з атмосферними масами.

Використання Лагранжевої моделі хмари є більш гнучким підходом, ніж принцип Гаусівського факела, оскільки він точніше наближається до фізичної суті розсіювання речовини у атмосфері (рис. 1.20).

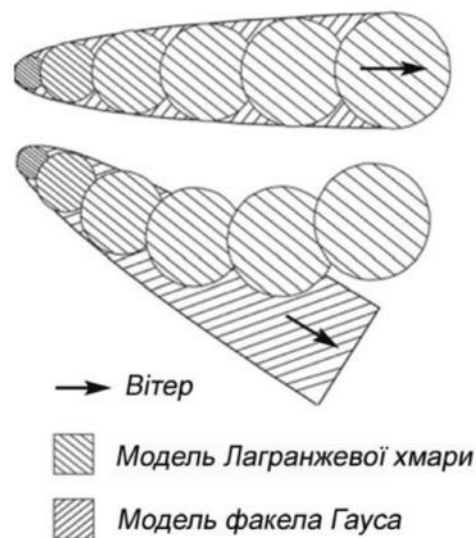


Рисунок 1.20 – Порівняння результатів моделей Гауса і Лагранжа

Модель Лагранжевої хмари дозволяє моделювати процес нестационарний у часі та просторі, досить коректно враховувати зміну напрямку вітру, складний рельєф місцевості, хімічні трансформації речовини.

Один з основних методів дослідження поширення забруднюючих речовин в атмосфері, передбачений нормами України це метод моделювання ОНД-86 [250].

ОНД-86 відноситься до негаусівської нормативної моделі поширення забруднювача від множини джерел, розроблена групою фахівців Головної геофізичної обсерваторії ім. Воейкова. В її основі лежать аналітичні апроксимації чисельного розв'язку рівняння адвективної дифузії, спочатку отримані для одиночних джерел забруднення, а потім інтегровані для сукупності лінійних і розосереджених по площі джерел забруднення.

Дана модель призначена, насамперед, для розрахунків найгірших полів концентрації, а не для розрахунків поточних концентрацій при конкретних метеоумовах. ОНД-86 застосовується в Україні в обов'язковому порядку при оформленні дозволу на викиди, при визначенні нормативів викидів («гранично припустимих концентрацій») у ході проектування нових промислових об'єктів.

У порівнянні з методикою ОНД-86, європейські методики також використовують більш широкий спектр шкідливих речовин та враховують їх взаємодію у складних атмосферних процесах, таких як формування смогу. Також враховуються різні фактори, що впливають на якість повітря, такі як кліматичні умови, сезонність та технічний прогрес.

Європейські методики, такі як EU AQI (Європейський індекс якості повітря), були розроблені з метою оцінки якості повітря у країнах Європейського Союзу та включають оцінку рівня забруднення повітря шкідливими речовинами, такими як діоксид азоту, діоксид сірки, пил ( $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ ) та інші. Індекс якості повітря є числовим значенням, який базується на оцінці рівня забруднення повітря шкідливими речовинами та встановлення рівнів ризику для здоров'я людини та екосистем.

Однією з основних відмінностей між методикою ОНД-86 та європейськими методиками є підхід до встановлення допустимих рівнів забруднення повітря. У методиці ОНД-86 максимально допустимі рівні

забруднення встановлюються на основі оцінки впливу на здоров'я людини та екологічних ризиків. У системі EU AQI, максимально допустимі рівні встановлюються на основі встановлених емісійних стандартів та рекомендацій Всесвітньої організації охорони здоров'я.

У моделі ОНД-86 використовується спрощений опис розсіювання шкідливих речовин, і обмежений об'єм метеорологічної інформації, характерний для конкретної ділянки. Аналітичні та чисельні розв'язки рівняння дифузії реалізовані в методиці ОНД-86, яка має ряд переваг (нормування викидів забруднюючих речовин) і недоліків (прогнозування і аналіз концентрацій забруднювачів для конкретних метеопараметрів).

Однак, методика ОНД-86 все ще використовується в Україні, тому її можна порівняти з іншими методиками, що використовуються у інших країнах. На сьогоднішній день європейські методики вважаються більш сучасними та ефективними для оцінки якості повітря та застосовуються в більшості країн Європи. Такі методики дають змогу краще розуміти проблему забруднення повітря та визначати ефективні заходи для її розв'язання.

Не варто забувати, що кожна країна має свої особливості щодо складу та рівня забруднення повітря. Тому, під час порівняння методик, важливо враховувати контекст конкретної країни та її регіонів. Наприклад, у місцях з високим рівнем промисловості чи забрудненими джерелами енергії, можуть бути інші пріоритети та обмеження щодо якості повітря. Важливо також зазначити, що методики не є статичними та постійно оновлюються, враховуючи нові наукові дослідження та технологічні розробки. В останні роки в Європі були запроваджені більш суворі норми щодо вмісту шкідливих речовин у повітрі, оскільки виявлено їх значний вплив на здоров'я людей. Під час порівняння методик також важливо враховувати їхню доступність та використання. Наприклад, методика ОНД-86 широко використовується у країнах Східної Європи та СНД, оскільки її впровадження було обов'язковим за радянських часів. У той же час, європейські методики можуть бути більш

розвиненими та точними, але не завжди доступними та підходять для використання в усіх країнах.

Кращим варіантом може бути комбінування різних методик, щоб отримати максимально точний та повний опис якості повітря. Тому, вибір методики для оцінки якості повітря має бути зроблений з урахуванням рівня забруднення, потреб споживачів у точності та доступності методик, оцінка якості повітря повинна проводитися з урахуванням унікальних умов та характеристик кожної конкретної території.

Аналізуючи різноманіття моделей можна зробити висновок, що більшість з них побудовані на основі Гаусівського розподілу. Аналіз робіт показав, що відсутні наукові публікації, де обговорювалися б результати експериментів з визначення коефіцієнтів дисперсії на території України (для обґрунтованого застосування їх в моделі Гауса при прогнозуванні міграції домішок в Україні) і знаходилося обґрунтування правильності використання емпіричних залежностей для коефіцієнтів дисперсії та інших параметрів. В цілому можна сказати, що аналітичні моделі не дозволяють комплексно врахувати ті закономірності, які відіграють суттєвий вплив на перенесення домішок в атмосфері в силу тих припущень, які прийняті для отримання аналітичного рішення [190].

Для вирішення актуальних глобальних проблем створюються наукові центри та школи під керівництвом провідних спеціалістів різних галузей науки, які займаються проблемами охорони навколишнього середовища від зовнішніх технологічних факторів. Наукові школи та центри мають наукові результати досліджень теоретичного та прикладного характеру. Огляд літератури вказує на те, що особливе місце посідає перелік актуальних екологічних проблем, які вирішуються за допомогою математичного моделювання. Тому, універсальним методом вирішення задачі розсіювання пилу в атмосферному повітрі є чисельне моделювання.

Значний теоретичний базис та науково-практичний інтерес до математичного моделювання процесів перенесення і дифузії аерозольних

часток в атмосфері внаслідок техногенного та антропогенного впливу на довкілля викладено в роботах [251-255].

Інтерес становить математична модель процесу поширення і дифузії дрібнодисперсних аерозолів та вуглекислого газу, що надходять в атмосферу від промислових об'єктів [251]. Проведено аналіз і обґрунтовано встановлено основні параметри, які впливають на процес поширення і дифузії дрібнодисперсних частинок у повітрі: швидкість вітру і його напрям; рельєф місцевості; турбулентність повітряних мас. Але залишилось невирішеним питання урахування параметрів джерел викидів. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з багатогранністю, нестационарною задачею і невизначеністю у вихідних даних.

У роботі [252] розглянуто процес поширення забруднюючих речовин від техногенного джерела забруднення (теплова електростанція). В результаті спалювання твердого палива виділяється значна кількість дрібнодисперсних аерозолів та інших полідисперсних речовин, для яких отримано двовимірну модель поширення забруднювачів у приземному шарі атмосфери з урахуванням термічної неоднорідності підстилаючої поверхні. Модель базується на системі рівнянь дифузійного поширення забруднюючих речовин, що дозволяє в подальшому розглянути тривимірну задачу чисельного моделювання.

Прогнозна чисельна модель поширення дрібнодисперсних зважених речовин [255] була отримана на підставі закономірностей процесу експлуатації нафтоносних пісків у Канаді. Модель враховує розподіл розмірів часток і 4 алгоритми поширення. Недоліком є тривалість обробки даних і складність процесу прогнозу.

Авторами [256] розроблено кінематичні моделі поширення частинок забруднюючих речовин в хмарі, яка описується системою квазілінійних диференціальних рівнянь у похідних параболічного типу вісесиметричного потоку, який характерний для купчасто-дощових хмар, що враховує процеси



переносу, дифузії та генерації забруднюючих речовин, турбулентність повітряних мас.

Значний резерв для вивчення питання математичного моделювання розсіювання забруднюючих речовин через використання методу кінцевих елементів становить робота [257], а візуалізацію програмних алгоритмів з використанням сучасних математичних засобів наведено в [258].

Основні проблеми моделювання розсіювання шкідливих газоподібних викидів в атмосфері розглянуто в роботі [259]. Для моделювання процесу розсіювання домішок розглядаються три основні підходи: Гаусівська дисперсія; інтегральні закони збереження речовини; чисельне моделювання. У цій роботі розроблена математична модель, яка описує такі процеси як: рух хмари забруднюючих речовин при змінній швидкості вітру по вертикалі; гравітаційне розсіювання; розсіювання хмари у вертикальному напрямку за рахунок атмосферної турбулентності; нагрівання або охолодження хмари забруднювачів за рахунок перемішування повітря; теплообмін з підстилаючою поверхнею. Автори при дослідженні процесу переносу та дифузії шкідливих речовин в атмосфері врахували зміну маси та внутрішньої енергії об'єму забруднюючих речовин та його фізичні характеристики та порівняли результати модельних розрахунків з експериментальними даними. За результатами чисельних розрахунків були зроблені наступні висновки: стандартні методи, засновані на Гаусівських моделях, не можуть з достатньою точністю передбачити поширення шкідливих речовин (особливо важких газів).

Основні підходи до створення комп'ютерних моделей атмосферних явищ представлені у роботі [260]. Авторами були розглянуті сучасні моделі поширення речовин (пилу та пилку) в атмосфері та показана перевага моделі SILAM Фінського метеорологічного інституту. В роботі розглянута фізична сторона проблеми аналізу викидів, розповсюдження та поглинання забруднюючих речовин.

Проведено ґрунтовний аналіз факторів, що впливають на процес поширення та дифузії шкідливих речовин в атмосфері [180]: режим циркуляції атмосфери та її термостійкість; атмосферний тиск, вологість, температурний режим; температурні інверсії, їх частота та тривалість; швидкість вітру, повторюваність штилю та слабого вітру (до 1 м/с); тривалість туману; рельєф, геологічні та гідрогеологічні умови місцевості; ґрунтово-рослинні умови (тип ґрунту, водопроникність, пористість, гранулометричний склад ґрунтів, стан рослинності, видовий склад, вік, клас ділянки); фонові значення показників забруднення природних компонентів атмосфери; стан тваринного світу.

Критичний аналіз щодо застосування фізико-математичних моделей атмосферної дифузії для дослідження забруднення атмосферного повітря шкідливими викидами двигунів внутрішнього згоряння автомобілів проведено в роботах [261, 262]. Розглянуто специфічні характеристики складу вихлопних газів, закономірності міграції та перетворення в приземному шарі атмосфери.

Авторами [263] побудована математична модель для опису динаміки тривимірного процесу забруднення від нестационарних джерел, у тому числі для конкретного фізичного стану атмосфери. У запропонованій моделі використовується пряме чисельне інтегрування рівнянь перенесення домішок в атмосфері з урахуванням основних фізичних факторів, що апроксимує цей метод для проведення обчислювальних експериментів. На основі розробленої математичної моделі створено інформаційну систему комп'ютерного моделювання процесу поширення забруднюючих речовин від промислових джерел викидів.

Заслужують уваги аналітичні дослідження процесів поширення викидів підприємств в атмосфері [264]. Вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) вважається основним забруднювачем атмосфери. У роботі розв'язано функцію Грина для задачі одноразового викиду шкідливих домішок у стабільний приземний шар атмосфери із заданим полем вітру та отримано рівняння для концентрації домішок у стаціонарному випадку та при безперервній роботі джерела забруднення. Побудовано графічні візуалізації рівнів полів забруднення

приземного шару атмосфери та проаналізовано їх перетворення при зміні параметрів джерела викидів.

В новій математичній постановці розглянута задача моделювання викидів газоподібних домішок в атмосферу [265], яка дозволяє ефективно врахувати взаємний вплив різних динамічних процесів, що відбуваються при реалізації виробничих процесів або в результаті аварій на промислових підприємствах.

Автором [266] створено інформаційну систему математичного моделювання процесу переносу та дифузії забруднюючих речовин в атмосфері з використанням програмного забезпечення «ArcGIS», що відображає реальний стан атмосферного повітря в регіонах. Але тут слід зазначити, що за цією системою результати можна отримати лише на окремих ділянках, і вони не можуть дати адекватної картини стану повітря на решті території.

Значна кількість досліджень з розробки математичних моделей динаміки та кінетики процесу переносу та дифузії газу та аерозольних домішок в атмосфері виконана за редакцією автора [267]. У роботі, зокрема, показано модель перенесення багатокомпонентних домішок на основі вивчення процесів фотохімічного перетворення та утворення аерозолів у тропосфері північної півкулі з урахуванням кінетичних процесів енуклеації, конденсації та коагуляції.

У роботі [268] представлено програмне забезпечення процесу розміщення легкозаймистих об'єктів та їх оптимізації з урахуванням рельєфу місцевості та просторової форми, що також враховує основу для подальшої розробки різноманітних математичних моделей.

Розроблено комп'ютерну модель для дослідження, прогнозування та моніторингу транспортування небезпечних речовин з автотранспорту в навколишнє середовище [269]. Наведено чисельну реалізацію моделі на комп'ютері з використанням методу кінцевих об'ємів на основі розробленого для обчислень розподіленого алгоритму.

У [270] запропоновано моделювання поля вітрових потоків на основі системи рівнянь Нав'є-Стокса з урахуванням стисливості та турбулентності

повітряного середовища, рельєфу місцевості, а як чисельний метод використано SIMPLE-алгоритм.

Процес перенесення та дифузії забруднюючих речовин в атмосферу з урахуванням різних кліматичних факторів та зовнішніх чинників розглянуто в роботі [271]. Розглянуто процес перенесення забруднюючих речовин від джерела утворення на основі рівняння адвекції забруднюючих речовин із повітряного потоку, перемішування забруднювачів за допомогою атмосферної турбулентності та молекулярної дифузії. Крім того, у роботі розглянуто процес перенесення з урахуванням різних фізико-математичних аспектів, пов'язаних із транспортуванням і дифузією забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери слабкими і сильними вітрами.

Робота [272] присвячена процесу моделювання дисперсії та дифузії летючих забруднюючих речовин, що викидаються лінійними джерелами забруднення у стабільний приземний шар атмосфери з узагальненою швидкістю вітру та квадратичною функцією висоти по вертикалі. Для цієї моделі було знайдено рішення за допомогою перетворення Лапласа для лінійних джерел в прикордонному шарі атмосфери. Рівняння враховує хімічну реакцію, що виникає в результаті взаємодії з повітряною масою, а також перетворення газоподібних забруднювачів у тверді частинки та їх осідання на поверхні землі.

Привертають увагу роботи [273-277], де колективом авторів розроблено математичне програмне забезпечення для вирішення задачі поширення багатокомпонентного повітряного середовища з урахуванням процесу переносу та дифузії забруднюючих речовин в атмосфері, зміни теплового режиму атмосфери, фазового переходу, а також впливу рослинного покриву.

Робота [278] присвячена дослідженню механізмів перенесення небезпечних речовин у повітряному середовищі приземного шару атмосфери на великі та середні відстані.

Моделюванню процесу забруднення атмосферного повітря присвячено також роботи [279-283], які поєднують використання сучасного

супутникового обладнання і потужних комп'ютерів для прогнозу і оцінки рівня забруднення довкілля. В роботі [281] розглянуто модель поширення дрібнодисперсного пилу на регіональному рівні з мінімальним кроком розрахункової сітки 10 км. У роботі [282] алгоритм моделі роботи із супутниковими знімками враховує параметри джерел викидів але при відхиленнях швидкості вітру похибка поширення аерозолів за висотою складає до 500 м. Моделі поширення забруднюючих речовин в роботах [281, 282] потребують використання значних матеріальних ресурсів і мають суттєвий недолік їх використання на локальному рівні (розрахункова щільність не менше 1 км).

Чисельне моделювання процесу турбулентних флуктуацій повітряних мас в приземному шарі, яке впливає на процес поширення забруднюючих речовин проведено у роботі [284]. Недоліком є відсутність узгодженого зв'язку з твердими завислими речовинами.

Зокрема у роботі [285] показано, що чисельна математична модель повинна враховувати хімізм реакцій забруднювача у повітрі, турбулентність атмосферного шару для врахування поширення забруднюючих речовин. Відмічено, що важливим є врахування зв'язку між концентрацією домішок і параметрами навколишнього середовища: швидкість і напрям вітру, турбулентність повітряних мас, поглинання забруднюючих речовин повітряними масами, зміну температури повітряних мас. Використання запропонованої моделі передбачає розуміння хімізму реакцій в приземному шарі і складність формування вихідних даних.

У зв'язку з багатогранністю, нестаціонарною задачею і невизначеністю у вихідних даних, дуже складно створити модель, яка б відповідала реальним процесам [286–290]. Ряд методик розрахунку зони забруднень, які входять в програмні пакети ANSYS CFX, FLOTTRAN чи PHAST DNV, мають складність вибору початкових і граничних умов, тривалий час розрахунку, потребу у спеціально сертифікованому персоналі. Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого розробці математичної

моделі перенесення забруднюючих речовин в атмосфері на основі чисельного моделювання.

Розробка та застосування спеціального математичного забезпечення є необхідною умовою достовірного прогнозування екологічного стану навколишнього середовища (приземного шару атмосфери) промислових зон населених пунктів. З метою прийняття оперативних рішень із подолання несприятливих ситуацій математичне забезпечення повинно дотримуватись послідовності наступних етапів:

- 1) постановка завдання і створення її інформаційного забезпечення (бази даних);
- 2) розробка математичної моделі досліджуваного процесу або об'єкта дослідження;
- 3) розробка чисельного алгоритму;
- 4) створення програмного застосунку для виконання розрахункових досліджень на комп'ютері;
- 5) інтерпретація результатів проведених чисельних розрахунків.

Актуальним є розробка моделі яка б була розрахована на поширення дрібнодисперсних зважених речовин, враховувала параметри джерел викидів, швидкість вітру і турбулентність повітряних мас, була комплексною і забезпечувала оперативність і достовірність отриманих значень [291–293].

### **1.8 Технологічне обладнання для очистки газових викидів від високодисперсних аерозолів**

Питання захисту атмосферного повітря, впровадження високоефективного пилогазоочисного обладнання є однією із складових, що впливають на формування рівня екологічної безпеки в цілому.

Очищення газових викидів від твердих і рідких механічних домішок є важливим елементом підвищення рівня екологічної безпеки виробничих процесів в хімічній, нафтохімічній, газовій промисловості та в суміжних

галузях. Різноманітність умов експлуатації та призначення обладнання обумовлює необхідність постійної розробки нових конструкцій сепараційних апаратів і вдосконалення методів підвищення їх продуктивності. Основною проблемою при виборі конструкцій газоочисного обладнання для заданих умов процесу є розрахунок ефективності очищення за певною дисперсною фазою. Однак, незважаючи на значні досягнення в теорії та практиці газоочищення, виникає багато проблем щодо розробки і використання високоефективного пилогазоочисного обладнання для видалення зважених речовин (аерозоль, туман) розміром менше 1-3 мкм. На даний час накопичено великий досвід із вирішення цих складних проблем вітчизняними та закордонними дослідниками [294–297].

Видалення частинок розміром менше кількох мікрметрів із викидів промислових газів є серйозною проблемою. Частинки такого розміру (дим, дрібні порошки або масляний туман), які можуть викликати серйозну шкоду для здоров'я людини, нелегко видалити звичайними методами.

Існуючі фільтри, циклони або інерційні мокрі скрубери, які використовують інерційні сили для видалення твердих забруднень, неефективні для очищення газів від дрібних частинок. Це пов'язано з тим, що рух таких частинок в основному зумовлений силами опору і молекулярними силами, а сила інерції відіграє меншу роль зі зменшенням розміру частинок. Більш щільні волокнисті фільтри можуть допомогти видалити дрібніші частинки, але вони працюють лише при значних значеннях тиску. Скрубери Вентурі використовують для уловлення аерозольних частинок краплі рідини при високій швидкості, але вони мають значний гідравлічний опір. Витрата води в форсункових скруберах становить близько 0,05 л/м<sup>3</sup>, а в скруберах Вентурі від 0,5 до 1,5 л/м<sup>3</sup> [294-299].

Сухі електрофільтри використовують електростатичні сили, але зарядка частинок розміром менше 1 мкм неефективна і ефективність очищення різко зменшується із зменшенням розміру частинок [300-302]. Також можна спостерігати повторне захоплення дрібних частинок на поверхні

осаджувального електрода. Зрошувані електрофільтри можуть лише частково вирішити проблему повторного захоплення частинок. У таких фільтрах частинки пилу заряджаються подібно до звичайних електрофільтрів, але осаджувальні електроди промиваються, а не струшуються. Промивка таких електрофільтрів усуває проблеми із залишковим коронним розрядом, але питання зарядження дрібних частинок все ще залишається невирішеним.

Тому, ефективне очищення частинок у діапазоні розмірів від 0,01 до 2 мкм, відоме у літературі як «Greenfield Gap» [303–306], залишається великою проблемою для інженерів. Для вирішення проблеми уловлення дрібнодисперсних часток із викидів технологічних процесів можна розглянути шляхи вдосконалення апаратів мокрого очищення газів.

Ефективність очищення можна визначити за вмістом дисперсної фази в газах на вході та виході з газоочисного апарату:

$$\eta = (G_{\text{кін}}/G_{\text{поч}}) \cdot 100\%, \quad (1.5)$$

де  $G_{\text{поч}}$  – масова витрата пилу на вході в апарат, г/с;

$G_{\text{кін}}$  – масова витрата пилу на виході з апарату, г/с.

Існує багато механізмів осадження частинок: гравітаційний, інерційний, турбулентний, відцентровий тощо. Розрахунок більшості промислових апаратів базується на поєднанні різних принципів осадження. Відповідно, ефективність уловлення залежить від різних параметрів.

Коли одночасно реалізується декілька механізмів і коли очищення проводиться в кількох послідовно з'єднаних апаратах (зонах), загальна ефективність є адитивною величиною:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \prod_i (1 - \eta_i), \quad (1.6)$$

де  $\eta_i$  – ефективність уловлення  $i$ -го механізму в  $i$ -му апараті (зоні).



Таким чином, аналіз існуючого стану виробництва та природоохоронних технологій, розробка та модернізація газоочисного обладнання у цілому призводить до зменшення забруднення атмосферного повітря та підвищення рівня екологічної безпеки.

### **1.8.1 Методи інтенсифікації процесів коагуляції і осадження аерозолів**

Технологічні та аспіраційні викиди промислових підприємств являють собою складні аерозольні системи, що містять різні газоподібні компоненти, пил сировини або готового продукту, а також смолисті сполуки, пари кислот і води. Відмінною рисою промислових газів, що відходять, є те, що шкідливі речовини перебувають у різних агрегатних станах. Дисперсний склад твердих частинок, що містять газові викиди, змінюється в широких межах, середній діаметр часток, як правило, не перевищує 10 мкм. Концентрація шкідливих речовин у вентиляційних викидах промислових підприємств невелика, але через значні обсяги вентиляційного повітря валові кількості шкідливих речовин, що надходять в атмосферу, досить значні. Через недосконалість технологічних процесів та пилогазоочисного устаткування діючих підприємств в атмосферу надходять гази, що містять різні за токсичністю газоподібні компоненти, пари органічних рідин, дрібнодисперсні краплі та тверді частинки [307]. Всі наведені факти ставлять завдання правильного вибору і розроблення вискоелективного пилогазоочисного обладнання, здатного здійснювати комплексну очистку газів [308–310].

Для зниження техногенного навантаження на довкілля від джерел аерозольних викидів потрібна вискоелективна пилогазоочисна апаратура з великою питомою продуктивністю. Аналіз шляхів інтенсифікації інерційно-дифузійних процесів, що лежать в основі технологій «мокрого» очищення газів від зважених речовин, призводить до напряму проведення цих процесів в інтенсивних режимах розвиненої турбулентності при великих навантаженнях по газовій фазі.

З робіт [99, 311–315] відомо, що інтенсивність процесів вловлення аерозольних частинок збільшується за наявності в робочій зоні обладнання різного роду флуктуацій, наприклад, пульсацій швидкості та тиску, що залучають частинки аерозолі у коливальний рух. Такий рух частинок збільшує ймовірність їх зіткнення і поліпшує перенесення частинок до поверхні осадження. Крім того, пульсації суцільної фази призводять до збільшення загальної поверхні осадження за рахунок коливань самих елементів поверхонь (крапель, плівок, струменів).

З метою інтенсифікації процесів осадження аерозольних частинок створюють умови виникнення коливання суцільного потоку, за допомогою спеціальних пристроїв [316]. Так, під час проведення процесу коагуляції з накладанням звукових пульсацій з частотою 10 кГц і при амплітуді коливань 54 мкм маса окремих частинок зважених речовин зростає в 200 разів. При високих інтенсивностях звуку нерідко утворюються агрегати, що містять кілька тисяч початкових частинок. Незважаючи на перевагу, методи інтенсифікації процесів осадження за допомогою механічних вібрацій та звукового коливання не знайшли широкого застосування в промисловості, так як для забезпечення коливання потоків необхідні спеціальні пристрої, які енергоємні, складні як у виготовленні, так і в експлуатації. Тому, перспективним напрямом є створення умов самофлуктуацій суцільного потоку, наприклад, забезпеченням його турбулентності [99, 311–315]. Це пояснюється зростанням коливального руху зважених у турбулентному потоці газу частинок аерозолі. Пульсаційний рух частинок обумовлено наявністю в турбулентному потоці хаотичних пульсацій (змін) швидкості у різних напрямках та відповідних пульсацій тиску у всіх точках потоку. Крім того, в апаратах має місце безладне перемішування пульсаційних обсягів (вихорів) газу між собою і як наслідок поява специфічної турбулентної дифузії частинок, що перевершує за своєю інтенсивністю звичайну молекулярну дифузію на кілька порядків. Відповідно [317, 318], коефіцієнт турбулентної дифузії може у  $10^4$ – $10^6$  разів перевищувати коефіцієнти молекулярної дифузії.

Дифузійний механізм процесу осадження для частинок розміром менше 0,5 – 1 мкм є основним. Для полідисперсних частинок розміром більше 1 мкм також має місце інерційний механізм [99, 319], що характеризується виникненням у турбулентному потоці інерційних відмінностей між самими частинками, а також між частинками та елементами поверхні осадження, що призводять до їх зіткнення. Зазначений ефект пояснюється відмінністю швидкостей руху частинок і, наприклад, крапель зрошуючої рідини, що залежить від їх розмірів та маси. Процес зіткнення аерозольних частинок і крапель зрошуючої рідини, згідно з інтерпретацією [100], можна розглядати як процес коагуляції частинок різних розмірів.

Інтенсивність процесів осадження збільшується зі зростанням різниці відносних швидкостей частинок аерозолі та структурних утворень рідини (крапель, плівок, струменів). Причому ефективність осадження і коагуляції досить висока в період утворення, відриву та прискорення крапель, плівок і струменів, а також при коливанні (пульсації) їх поверхонь [320, 321]. Тому, для уловлення аерозолів у колонних апаратах мокрого типу доцільно створювати умови послідовного та багаторазового подрібнення та укрупнення зрошуючої рідини [322].

### **1.8.2 Ефективність осадження аерозолів в апаратах з регулярною пульсаційною насадкою**

Існуючі на промислових підприємствах схеми очищення газів мають одну, дві, а на деяких стадіях – і більшу кількість ступенів. У промислових схемах використовується як паралельне, так і послідовне з'єднання апаратів. При послідовному з'єднанні не відбувається поділу проміжних потоків. Така схема дозволяє підвищити ефективність газоочисної системи. Паралельне з'єднання застосовують при необхідності очищення великих обсягів газів і при малій продуктивності одиничних апаратів. Використовуватись також комбіновані схеми з'єднання апаратів, але і це не забезпечує необхідної

ефективності очищення. Така ситуація пояснюється експлуатаційними причинами, а також деякими особливостями технологічного устаткування та фізико-хімічними характеристиками газів, які викидаються [323, 324].

Велика розмаїтість наявних типів газоочисного обладнання утруднює раціональний вибір його для кожного конкретного випадку. Правильну порівняльну оцінку обладнання і обґрунтування його вибору можна зробити лише при одночасному врахуванні гідродинамічних і дифузійних характеристик [325].

Одним із шляхів інтенсифікації інерційно-дифузних процесів осадження, що становлять основу технології «мокрого» очищення газів від аерозолів (туману, пилу, диму та ін.), є проведення цих процесів у режимі розвиненої турбулентності. Його реалізація можлива в апаратах із регулярною пульсаційною насадкою (РПН). Апарати з РПН характеризуються високою ефективністю вловлювання різних по дисперсності аерозолів, здатністю до самоочищення контактних елементів від різних злипливих включень, низькою матеріаломісткістю та високою надійністю в експлуатації, що робить їх досить перспективними у широкому промисловому використанні [326].

Апарати мокрого пиловловлення можуть використовуватися для видалення частинок дрібнодисперсного пилу. При цьому уловлювання частинок реалізується з допомогою різних механізмів [327]. Значною мірою ефективність пиловловлення буде залежити від розміру крапель рідини [328, 329].

Відповідно, існують частинки розміром 0,1-1,0 мкм, для ефективного уловлювання яких необхідно враховувати різні механізми осадження, а ефективність уловлювання різних за дисперсним складом частинок має мінімальне значення, яке називається «мінімальним ефективним діаметром уловлювання» частинок [330, 331].

Ефективність уловлювання дрібнодисперсних частинок (аерозолів) в апаратах мокрої очистки розраховується шляхом дослідження картини поведінки одиначної краплі, частки частинок, які були поглинені об'ємом

досліджуваної краплі в процесі роботи апарату і подальшого підсумовування всіх крапель в одиниці об'єму газового потоку. Визначити ефективність цієї взаємодії можна шляхом вирішення рівняння Нав'є-Стокса для повітряного потоку навколо краплі рідини. Однак отримати теоретичне рішення рівняння Нав'є-Стокса є важким завданням через складну структуру течії потоку з урахуванням внутрішньої циркуляції крапель. Тому, викликає інтерес підхід до визначення ефективності взаємодії крапель рідини та твердих частинок забруднюючої речовини за рахунок урахування різних механізмів осадження частинок в апараті [332].

Фізико-хімічні параметри частинок аерозолі та характер течії газового потоку, що генерує певні турбулентні потоки та пульсації в апараті, є визначальними факторами, що впливають на ефективність осадження частинок аерозолі.

Механізм утворення крапель розглянутий у роботі [326], де отримано рівняння для розрахунку діаметра крапель поглинаючої рідини, що утворюються при взаємодії парогазорідного потоку в апаратах мокрого очищення.

Виходячи з даних роботи [333] для частинок аерозолі діаметром більш ніж 0,05 мкм загальну ефективність уловлювання аерозольних частинок в апаратах мокрого пиловловлення можна представити сумою ефективностей уловлювання за рахунок дифузійного механізму, механізму захоплення частинок та інерційного механізму взаємодії:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_{diff}) \cdot (1 - \eta_{int}) \cdot (1 - \eta_{imp}), \quad (1.7)$$

де  $\eta_{diff}$  – ефективність уловлювання за рахунок дифузійного механізму;

$\eta_{int}$  – ефективність уловлювання з допомогою механізму захоплення частинок крапель рідини;

$\eta_{imp}$  – ефективність уловлювання за рахунок інерційного механізму.

Дослідження апарата ударно-інерційної дії [325] із РПН показали, що переважними механізмами осадження є інерційний і дифузійний. Отримано вираз для розрахунку ефективності інерційного пиловловлення:

$$\eta_{imp} = 1 - \exp\left(-\frac{3 m_y K_3 w_{відн} t_e}{2 w_{кр} D_k}\right), \quad (1.8)$$

де  $m_y$  – питоме зрошення,  $10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;

$t_e$  – вертикальний крок розміщення насадочних елементів, м;

$w_{кр}$  – дійсна швидкість краплі, м/с;

$w_{відн}$  – відносна швидкість краплі, м/с;

$D_k$  – діаметр краплі поглинаючої рідини, м;

Для коефіцієнта захоплення отримано рівняння, яке враховує умови взаємодії частинок із краплею рідини і фізико-хімічні властивості пилу:

$$K_3 = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,25)^2} \left[ \exp\left(-5,1 \cdot 10^{-4} \frac{D_k}{d_u}\right) - \exp\left(-4,5 \frac{l_k}{D_k}\right) \right], \quad (1.9)$$

де  $Stk$  – критерій Стокса;

$d_u$  – діаметр частинки забруднюючої речовини, м;

$$l_k = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_2 - \rho_p)}} - \text{капілярна постійна.}$$

Для урахування турбулентно-дифузійного механізму осадження частинок розміром 1-2 мкм і більше у насадковій зоні апарата отримане [71] рівняння для розрахунку ефективності пиловловлення:

$$\eta_{diff} = 3,75 \left( \frac{w_2 D_k}{D_2} \right)^{-1/4}. \quad (1.10)$$

Конструктивні особливості апаратів з РПН дозволяють проводити окрім коагуляції процеси конденсаційного пиловловлення.

Процес очищення пилогазових викидів від дрібнодисперсних зважених речовин з використанням конденсаційного механізму пиловловлення реалізується в кілька основних етапів: насичення потоку, що містить дрібнодисперсні речовини парою, конденсаційне збільшення частинок речовини, виділення дисперсної фази.

Дрібнодисперсні зважені речовини, які знаходяться у парогазовій чи парорідинній суміші виконують роль активних центрів конденсації і після досягнення початку процесу зростання на їх поверхні утворюються окремі ядра конденсації (дрібні краплі нової фази), а потім суцільний шар рідини, товщина якого продовжують збільшуватися, що призводить до укрупнення і збільшення маси частинки. При цьому змочуваність і розчинність початкової частинки вже не відіграють суттєвого впливу, так як конденсація фактично відбувається на поверхні рідкого шару. Експериментальні дослідження підтверджують конденсаційне збільшення за звичайних умов дозволяє збільшити розмір частинок від 1 до 10–15 мкм, що в подальшому дозволяє підвищити ефективність процесу пилоочищення.

Інтенсивність процесів осадження збільшується в період утворення, відриву та прискорення крапель, плівок і струменів, а також при коливанні (пульсації) їх поверхонь. Тому, доцільно створювати умови послідовного та багаторазового дроблення та злиття зрошуючої рідини під час уловлювання дрібнодисперсних речовин у апаратах з РПН.

Порівняльна характеристика існуючих видів високоінтенсивного пиловловлюючого обладнання в якому реалізуються певні механізми пилоочищення наведена в табл. 1.7 [71, 321].

Як видно з табл. 1.7, за ефективністю роботи апарати з РПН не поступаються іншим конструкціям високоінтенсивного пилогазоочисного обладнання, мають низьку матеріаломісткість та невелику витрату енергії, що зменшує капітальні та експлуатаційні витрати на їх роботу.

Таблиця 1.7 – Основні показники високоінтенсивних схем пилогазоочищення

№ з/п	Найменування параметру	Од. вимірюв.	Показники			
			Пінний апарат	Апарат зі зваженою насадкою	Апарат з ПТВО ( $d_o=0,15$ м)	Апарат з РПН
1	Об'ємна витрата газу на пилоочищення	тис.м <sup>3</sup> /год	20	40	40	40
2	Робоча швидкість газу	м/с	2,5	4,5	3,5	10
3	Запиленість ( $d_{50}=5$ мкм)	10 <sup>-3</sup> кг/м <sup>3</sup>	1,5	2,5	2,5	2,5
4	Питоме зрошення	10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,8	0,8	1,5–2	1,0
5	Гідравлічний опір	Па	800	1000	1300	500
6	Висота газорідного шару	м	0,1	0,34	0,6	-
7	Ефективність пиловловлення	%	90	92	98	98
8	Механізми пиловловлення: - інерційний - дифузійний - конденсаційний	так/ні	так так ні	так так ні	так так ні	так так так

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про перспективність застосування апаратів цього типу в процесах пилогазоочищення. Питання уловлювання високодисперсних аерозольних частинок, а також вплив гідродинамічних параметрів на процес їх осадження та фракційну ефективність, крім рідких аерозолів (туманів) [333], залишається актуальною проблемою сьогодення. Тому, потребує детального дослідження опис фізичної та математичної картини процесу уловлення дрібнодисперсних речовин в апаратах з РПН.



## 1.9 Постановка задач дослідження

Як впливає з аналізу літературних джерел, зниження техногенного навантаження на довкілля від викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини та збереження якості атмосферного повітря неможливе без впровадження природоохоронних заходів, які включають застосування високоефективного газоочисного обладнання.

Мета дисертаційної роботи полягає в розробленні, обґрунтуванні та удосконаленні наукових основ системного підходу щодо зниження техногенного навантаження викидів промислових виробництв, які містять дрібнодисперсні зважені речовини на навколишнє середовище шляхом комплексної розробки методів прогнозування забруднень, методик вибору та використання високоефективного пилогазоочисного обладнання.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- провести аналіз факторів екологічної небезпеки від викидів промислових підприємств, які містять дрібнодисперсний пил ( $PM_{2,5}$ );
- провести аналіз законодавчої бази України на відповідність Європейському законодавству щодо охорони атмосферного повітря та встановлення необхідних напрямків діяльності на шляху до євроінтеграції промислового виробництва;
- з метою підвищення рівня екологічної безпеки населених пунктів установити залежність між забрудненням атмосферного повітря твердими частинками  $PM_{2,5}$  і показниками здоров'я населення та розробити математичну модель поширення дрібнодисперсних зважених речовин у приземному шарі атмосфери;
- розробити програмні застосунки для оцінки, контролю та інформування громадськості щодо техногенного впливу від промислових викидів дрібнодисперсного пилу  $PM_{2,5}$ ;

– розробити методики вибору високоефективного пилогазоочисного обладнання для зменшення техногенного навантаження від викидів дрібнодисперсного пилю промислових підприємств на довкілля;

– розробити конструкції пилоочисного обладнання з розвиненою поверхнею контакту фаз для вловлювання дрібнодисперсного пилю;

– провести теоретичне та експериментальне дослідження ефективності пиловловлювання в розроблених конструкціях пилогазоочисного обладнання;

– дослідити фактори впливу на ефективність пилоочищення в розроблених типах високоефективних пилогазоочисних апаратів.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [25, 39, 125, 129, 130, 135, 136, 164, 281, 293, 310, 322, 326].

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ Й МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Системний аналіз для вирішення поставлених задач дослідження

Методологічною основою запровадження системи оптимальних природозахисних технологічних рішень для зниження техногенного навантаження на довкілля від пилових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, оцінки стану компонентів довкілля та вибору способів підвищення екологічної безпеки промислових виробництв є системний підхід. Системний підхід доцільно використовувати для удосконалення системи «викиди виробництва – природозахисне обладнання – зменшення техногенного навантаження на довкілля», аналізу проблем і в процесі прийняття управлінських рішень. Системний аналіз є найбільш конструктивним напрямком, що використовується для практичного застосування та дозволяє проводити дослідження з врахуванням всіх суттєвих факторів, які дозволяють побудувати ефективні системи управління в конкретних умовах [128].

У системних дослідженнях виділяють три аспекти [334]:

- розроблення теоретичних засад системного підходу;
- побудова адекватного підходу дослідницького апарату (формальна сфера);
- застосування системних ідей та методів (прикладна сфера).

Системний підхід являє собою сукупність методів і засобів, що дозволяють досліджувати властивості, структуру та функції об'єктів та процесів у цілому, представивши їх як системи зі складними міжелементними взаємозв'язками, взаємовпливом самої системи на її структурні елементи.

Системний підхід до розгляду поняття екологічної безпеки базується на всебічному вивченні умов формування небезпеки та домінуванні технічних

методів регулювання її станів. Системний аналіз є одним із напрямів системного підходу та у вузькому сенсі є методологією ухвалення рішень, а в широкому сенсі – синтезом методології загальної теорії систем, системного підходу і системних методів обґрунтування та ухвалення рішень. Він дозволяє розділити складне завдання на сукупність простих завдань, розчленувати складну систему на елементи з урахуванням їх взаємозв'язку. Таким чином, системний аналіз виступає як процес послідовної декомпозиції вирішуваної складної проблеми на взаємозв'язані складові проблеми [335, 336].

Досліджувана система  $S$  математично може бути представлена як багатомірна складова із структурою:

$$S = \sum_{k=1}^n S_k, \quad (2.1)$$

де  $S_k$  – підсистеми великої системи;

$n$  – розмірність підсистем великої системи.

Кожну підсистему великої системи, у свою чергу, можна представити у вигляді багатомірної складової структури, яка складається з лінійно незалежних компонент – узагальненого ряду Фур'є [337]:

$$S_k = \sum_{i=1}^m c_{ki} \eta_i, \quad k = \overline{1, n}, \quad (2.2)$$

де  $\eta_i$  – ортонормовані базисні компоненти;

$c_{ki}$  – коефіцієнти розкладення;

$m$  – розмірність узагальненого ряду Фур'є.

З урахуванням (2.2) вираз (2.1) отримує вигляд:

$$S = \sum_{k=1}^n S_k = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m c_{ki} \eta_i. \quad (2.3)$$

Із виразу (2.3) випливає, що будь-яка велика система – це з одного боку, багатомірна сукупність підсистем  $S_k$ , з другого – багатомірна сукупність різних складових компонентів  $c_{ki}\eta_i$ . Функціонування компонентів великої системи «Екологічна безпека» спрямовано на досягнення єдиної мети – поліпшення стану навколишнього природного середовища [338, 339]. Усі підсистеми і компоненти великої системи об'єднані в єдину цілісність для досягнення єдиної мети.

Системний аналіз є одним із напрямків системного підходу. Системний аналіз у вузькому сенсі є методологією прийняття рішень, а широкому значенні – синтез методології загальної теорії систем, системного підходу і системних методів обґрунтування та прийняття рішень.

Системний аналіз дозволяє розділити складне завдання на сукупність простих завдань, розчленувати складну систему на елементи з урахуванням їхнього взаємозв'язку. Таким чином, системний аналіз постає як процес послідовної декомпозиції розв'язуваної складної проблеми на взаємопов'язані приватні проблеми.

Одними із принципових особливостей системного аналізу, що відрізняють його від інших напрямів системних досліджень, є розроблення і використання засобів, що полегшують формування і порівняльний аналіз цілей і функцій систем управління.

Для розв'язання задачі щодо зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище викидів промислових виробництв можливі етапи системного аналізу наведені на рисунку 2.1, що проявляється через прогнозування або мінімізацію забруднення об'єктів навколишнього середовища викидами дрібнодисперсних зважених речовин.

Пунктирні лінії показують, повернення до попередніх етапів, тобто рух у зворотньому напрямі у тому випадку, якщо виникають труднощі на попередніх етапах дослідження, які можуть призвести до неправильного розв'язку.

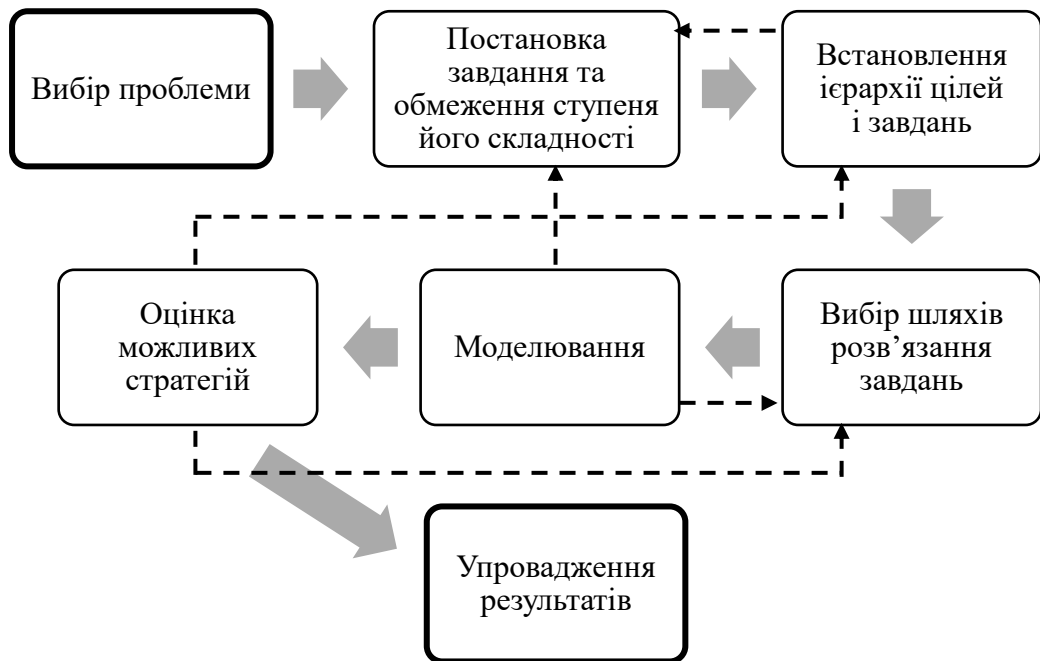


Рисунок 2.1 – Принципова схема системного аналізу для вирішення поставлених задач дослідження

### Етап 1. Вибір проблеми.

Проблема, яку потрібно розв'язати в межах дисертаційного дослідження, має комплексний багатоплановий характер, оскільки пов'язана із зниженням техногенного навантаження на всі компоненти довкілля через повітря під час викидів промислових виробництв як за умови робочого технологічного режиму, так і у випадку аварійних ситуацій.

### Етап 2. Постановка завдання і обмеження ступеня її складності.

З огляду на означену проблему постає низка завдань, які потрібно виконати:

- визначити вплив на атмосферне повітря, ґрунти, поверхневі води та біоту викидів дрібнодисперсних зважених речовин під час роботи промислових підприємств;

- науково обґрунтувати вибір методів попередження або мінімізації рівня забруднення компонентів довкілля;

- розробити і обґрунтувати технологічні рішення щодо зменшення викидів забруднюючих речовин;

- розробити та впровадити алгоритм комплексного вибору систем пилогазоочищення, що передбачає наукове обґрунтування специфіки фізико-хімічного складу речовин, умов проведення процесу і параметрів природоохоронного обладнання на підставі застосування інформаційних баз даних, що задовольняє вимоги екологічної безпеки;

- на підставі математичного моделювання процесу поширення димів в атмосфері спрогнозувати розміри зони впливу викидів промислових виробництв;

- дослідити процес пиловловлення дрібнодисперсних зважених речовин у високоефективних конструкціях апаратів.

### **Етап 3.** Встановлення ієрархії цілей і завдань.

Цей етап було реалізовано відповідно до попереднього етапу, на якому були визначені завдання та описані методи їх виконання.

### **Етап 4.** Вибір шляхів рішення задач.

На цьому етапі конкретизували методи вирішення окремих поставлених завдань. Для попередження й мінімізації рівня забруднення компонентів довкілля використовували науково обґрунтований комплексний підхід, що полягає в необхідності розроблення засобів контролю та моніторингу стану забруднення атмосферного повітря. Контроль може здійснюватися як на рівні держави, так і внаслідок реалізації громадського контролю. Для побудови прогнозної математичної моделі поширення забруднюючих речовин використовували математичний аналіз і чисельне розв'язання рівняння перенесення речовини в турбулентному середовищі.

Комплексний підхід потребує застосування математичних та фізичних методів обґрунтування мети дослідження на різних етапах. Для очищення від викидів дрібнодисперсних зважених речовин пропонується використовувати фізичні методи дослідження лабораторних установок високоефективного пилогазоочисного обладнання; для опису процесу пиловловлення

використовували опис фізичної картини з математичним описом процесів конденсації, коагуляції та вихроутворення в робочих зонах пилогазоочисного обладнання; для обґрунтованого вибору природозахисного обладнання застосовували математичні оптимізаційні й ієрархічні методи досліджень.

#### **Етап 5. Моделювання.**

Моделюванню підлягають дослідження процесу поширення домішок в приземному шарі атмосфери і визначення зони впливу від викидів промислових виробництв, а також математичний опис взаємодії частинок забруднюючої речовини в контактній зоні пилогазоочисного апарата для підвищення ефективності очищення.

#### **Етап 6. Оцінка можливих стратегій.**

Полягає в оптимальному виборі технологічних природозахисних рішень з урахуванням бажаного екологічного й економічного ефекту від упровадження на виробництві.

#### **Етап 7. Впровадження результатів.**

Полягає в рекомендаціях і впровадженні у проектну й виробничу діяльність результатів дослідження.

## **2.2 Методика дослідження впливу дрібнодисперсних зважених речовин на здоров'я людини**

З метою встановлення ступеня впливу дрібнодисперсного пилу на людину застосовано математично-статистичне моделювання впливу респірабельного пилу на систему кровообігу людини. В якості вихідних даних взято статистичні дані щодо обсягів викидів суспендованих твердих частинок в атмосферу та зареєстрованих випадків хвороб систем кровообігу у населення України протягом 2013-2020 років [340, 341].

Для оцінки взаємозв'язку використовуємо метод кореляційно-регресійного аналізу, що дозволяє встановити одночасний зв'язок між декількома факторними ознаками. Згідно вищезазначеного методу



передбачається, що зв'язок між факторною та результативною ознаками описується певним рівнянням – рівнянням регресії. Аналіз графічних залежностей факторних ознак може бути у вигляді рівняння прямої, параболи, гіперболи тощо. З використанням теоретичного аналізу або графічного методу проводять вибір конкретного рівняння.

Лінійне рівняння регресії, яке використовують за наявності прямолінійного зв'язку між показниками має вигляд:

$$Y_x = a_0 + a_1 X \quad (2.1)$$

де  $a_0, a_1$  – параметри рівняння регресії;

$Y_x$  – розрахункові або теоретичні значення результативної ознаки;

$X$  – значення факторної ознаки.

Параметр  $a_1$  є коефіцієнтом регресії, який показує, на скільки одиниць змінюється ( $Y$ ) при збільшенні ( $X$ ) на одиницю. Знак при  $a_1$  характеризує напрямок зв'язку («+» – прямий, «-» – обернений).

В багатьох випадках на результативну ознаку ( $Y$ ) впливає не один, а кілька факторів ( $X$ ). Між ними існують складні взаємозв'язки, тому їх вплив на результативну ознаку є комплексним, його не можна розглядати як просту суму ізольованих впливів. В цьому випадку результативна ознака ( $Y$ ) пов'язується за допомогою рівняння множинної регресії з двома або більше факторними ознаками ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m$ ):

$$Y_x = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_m X_m. \quad (2.2)$$

Результати кореляційно-регресійного аналізу можуть бути використані для розробки більш ефективних стратегій зменшення впливу пилу на здоров'я людини. Збільшення рівня пилу в повітрі веде до збільшення ризику

захворювання на певні хвороби, тому можуть бути запропоновані заходи для дотримання екологічних норм:

- оцінки і прогнозування викидів;
- зменшення викидів шляхом використання високоефективних методів очищення повітря.

### **2.3 Об'єкт дослідження**

Об'єктом дисертаційного дослідження є техногенний вплив промислових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини на навколишнє природне середовище. Тому, в роботі розглянуто основні характеристики пилу як фактора екологічної небезпеки та складової об'єкта дослідження, проведено паспортизацію пилу [342]. Проведення паспортизації пилу є необхідним кроком на шляху до вдосконалення систем очистки пилогазових викидів виробництв [343, 344].

Для розроблення заходів щодо запобігання забрудненню навколишнього середовища пиловими викидами було проведено паспортизацію пилу двоокису титану, як дрібнодисперсного компонента пилогазових викидів об'єкту хімічної промисловості.

Паспорт пилу містить у собі найменування пилу, дані про пилоутворюючий агрегат, результати визначення фізико-хімічних властивостей пилу і характеристику газу – носія.

Стандартна методика перевірки ефективності мокрих пиловловлювачів ґрунтується на уловленні часток тальку, розміром 2–10 мкм [345]. Ефективність очистки газових викидів залежить від обґрунтовано обраного пиловловлюючого обладнання. Різні фізико-хімічні властивості пилу впливають на роботу газоочисних систем. Тому, з метою підвищення ефективності очистки повітря, а також попередження втрат продукту та сировини на ПАТ «Сумхімпром», замість еталонного пилу проводимо дослідження на реальному пилу хімічного виробництва.

Для паспортизації пилу двоокису титану було виконано відбір проби газу після пилової камери на стадії прокалки гідратованого двоокису титану. На цій стадії використовують порожнисті аміачні скрубери, недоліком яких є значні витрати аміачної води та невисокий ступінь очищення. Застосування інших видів пилоочисного обладнання є проблематичним через забивання контактних пристроїв часками кальцинату двоокису титану, внаслідок адгезійних властивостей, які в більшості залежать від дисперсного складу пилу.

Пил двоокису титану належить до групи неорганічного пилу, являє собою порошок білого кольору. Частинки мають як кристалічну так і округлу форму. У загальній масі пил білого кольору. Загальний вигляд пилу двоокису титану за допомогою електронного мікроскопа «РЕМ-106-і» зі збільшенням Х4000 зображено на рис. 2.2.

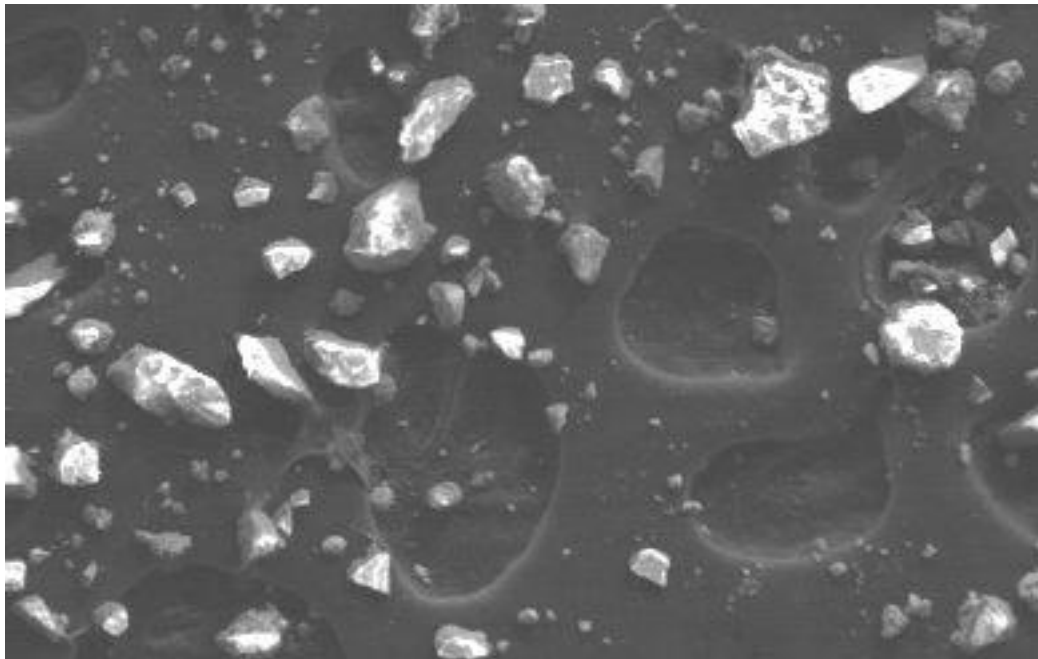


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд пилу двоокису титану (збільшення Х3000)

Лабораторні дослідження показали [342], що переважають частинки 0,2–0,4 мкм, тобто пил є дуже дрібнодисперсним. Дисперсний склад пилу

визначали за допомогою приладу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 шляхом седиментації в гліцерині. Вміст частинок розміром менше 0,2 мкм складає 10%, частинок діаметром 0,2–0,3 мкм – 37%, діаметром 0,3–0,4 мкм – 31%, діаметром 0,4–0,5 мкм – 13%, частинок діаметром більше 0,5 мкм – 9% (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Дисперсний склад пилу  $\text{TiO}_2$  (седиментація в гліцерині)

$d_q$ , мкм	<0,2	0,2–0,3	0,3–0,4	0,4–0,5	>0,5
Об'ємний вміст частинок, %	10	37	31	13	9

За допомогою інтегрального розподілу вмісту частинок  $\text{TiO}_2$  було встановлено середній розмір частинок пилу  $d_{50} = 0,305$  мкм та середньоквадратичне відхилення розподілу частинок пилу  $\sigma = 0,29$ .

З метою апроксимації результатів розподілу частинок пилу за дисперсністю побудовано графіки розподілу в Microsoft Excel (рис. 2.3).

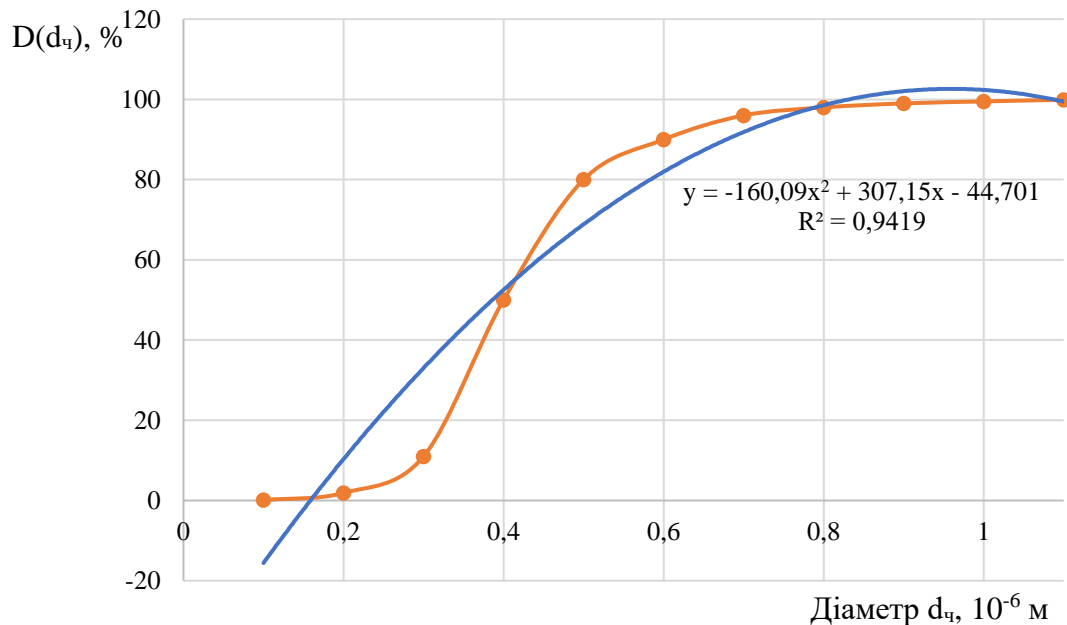


Рисунок 2.3 – Розподіл маси пилу двоокису титану за розмірами

Аналіз рис. 2.6 дозволив отримати степеневу залежність 2-го ступеня розподілу часток за дисперсністю для правильного підбору відповідних конструкцій пилогазоочисного обладнання.

$$y = -160,09x^2 + 307,15x - 44,701. \quad (2.6)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (2.6) складає  $R^2=0,9419$ .

Механічні властивості пилу двоокису титану представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості пилу  $TiO_2$

Найменування	Позначення	Чисельне значення
Щільність	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2850-2920
Насипна щільність (неуцільнений стан)	$\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	920-970
Насипна щільність (уцільнений стан)	$\rho_y$ , кг/м <sup>3</sup>	1200-1240
Коефіцієнт ущільнення	$K_y$	1,52-1,58
Розривна міцність (здатність до злипання)	$T_p$ , Па	758-802
Кут природного відкосу статичний	$\alpha_{ст}$	57-58
Кут природного відкосу динамічний	$\alpha_0$	52-53
Крайовий кут змочування	$\Theta$ , град	36

Проведена паспортизація вказує на те, що пил  $TiO_2$  є дрібнодисперсним з середнім діаметром частинок 0,3 мкм, а також має здатність до злипання і утворення агломерацій, що дозволяє проводити процеси очищення в апаратах, які забезпечують потрібні механізми очищення.

Оскільки розмір частинок пилу  $TiO_2$  навіть менший нормованої величини  $PM_{2,5}$ , то такий пил може залишатися у повітрі довгий час та переміщуватися на значні відстані. Викиди, які містять пил  $TiO_2$  мають потенціал негативно

впливати на здоров'я населення через тривалий час перебування у завислому стані в атмосферному повітрі та забруднення атмосферного повітря на більшій території, ніж біля джерела викидів.

## **2.4 Побудова алгоритмів вибору природоохоронного обладнання**

Одним із сучасних математичних інструментів аналізу і спрощення інформації є побудова графів [346].

Вирішення прикладних задач в області природоохоронних технологій потребує адаптації баз даних інформації із загального опису на математичну основу, потім на мову алгоритмів, і далі – на конкретну мову програмування, або навпаки, в зворотному порядку.

Мета побудови графів - представити різні типи складних даних, для їх адекватного опису в тексті, або алгоритмі. Об'єкти розглядаються як вершини, або вузли графу, а зв'язки – як дуги, або ребра. Для різних галузей види графів можуть відрізнятися орієнтованістю, обмеженнями на кількість зв'язків і додатковими даними про вершини або ребра.

Побудову графу в роботі виконано в програмному середовищі Gephi, на основі алгоритму зниження розмірності, а саме за допомогою методики UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) [346]. Цей алгоритм побудовано на засадах ріманової геометрії і топологічної алгебри. UMAP зберігає найбільшу частину глобальної структури з чудовою продуктивністю під час його виконання. До головних параметрів алгоритму належать: кількість сусідів, мінімальна відстань, метрика відстані, розмірність кінцевого простору.

Враховуючи, що набір вершин використовується для абстрагування будь-якого типу даних, теорія графів глибоко вивчає взаємозв'язок між ними та може дати відповіді на ряд оптимізаційних питань природоохоронних технологій. Графи в промисловості використовуються для розв'язання різноманітних теоретичних та практичних задач. Застосування теорії графів

базується на побудові та аналізі різноманітних елементів технологічних схем та результатів їх використання у вигляді моделей, важливими для яких є лише характер зв'язку між вершинами. Ребра та вершини цих графів відображають технологічні поняття, явища, процеси та об'єкти і відповідно якісні і кількісні зв'язки або певні відношення між ними.

Виходячи зі специфіки роботи природозахисного обладнання, формуються вимоги до пилогазоочисного обладнання, яке буде відповідати умовам проведення процесу очищення від викидів певних забруднюючих речовин, для забезпечення якого необхідно розробити оптимальну методику вибору обладнання[348].

Оскільки завдання розробки такої технології є інваріантним, тобто реалізується різними методами або їх комбінацією, на першому етапі спрямованого вибору формуємо матрицю досяжності розв'язання задачі  $S=[s_i]$ , яка визначається наступним чином:

$$\begin{cases} 1, \text{ якщо вершина } \Phi_0 \text{ досяжна з } \Phi_i, \\ 0, \text{ якщо вершина недосяжна,} \end{cases} \quad (2.7)$$

де  $\Phi_0$  - розв'язання задачі,  $\Phi_i$ - елемент розв'язання.

Таким чином, відбувається відсівання всіх варіантів, які не забезпечують необхідні вимоги (тупикові варіанти). Сукупність варіантів реалізації задачі знаходження оптимального природозахисного обладнання представляємо у вигляді графа (рис. 2.4).

Граф є орієнтованим, його вершина  $\Phi_0$  – розв'язання задачі, рівні графа відповідають етапам розв'язання, тобто. необхідної сукупності задіяних методів із можливих «m» варіантів комбінацій. Вузли графа – методи досягнення необхідних вимог на кожному етапі. Ребрами графа є комбінації, що дозволяють реалізувати конкретний метод. Початок розв'язання задачі (витік) - «висяча» вершина графа, тобто нижній рівень розбиття задачі.

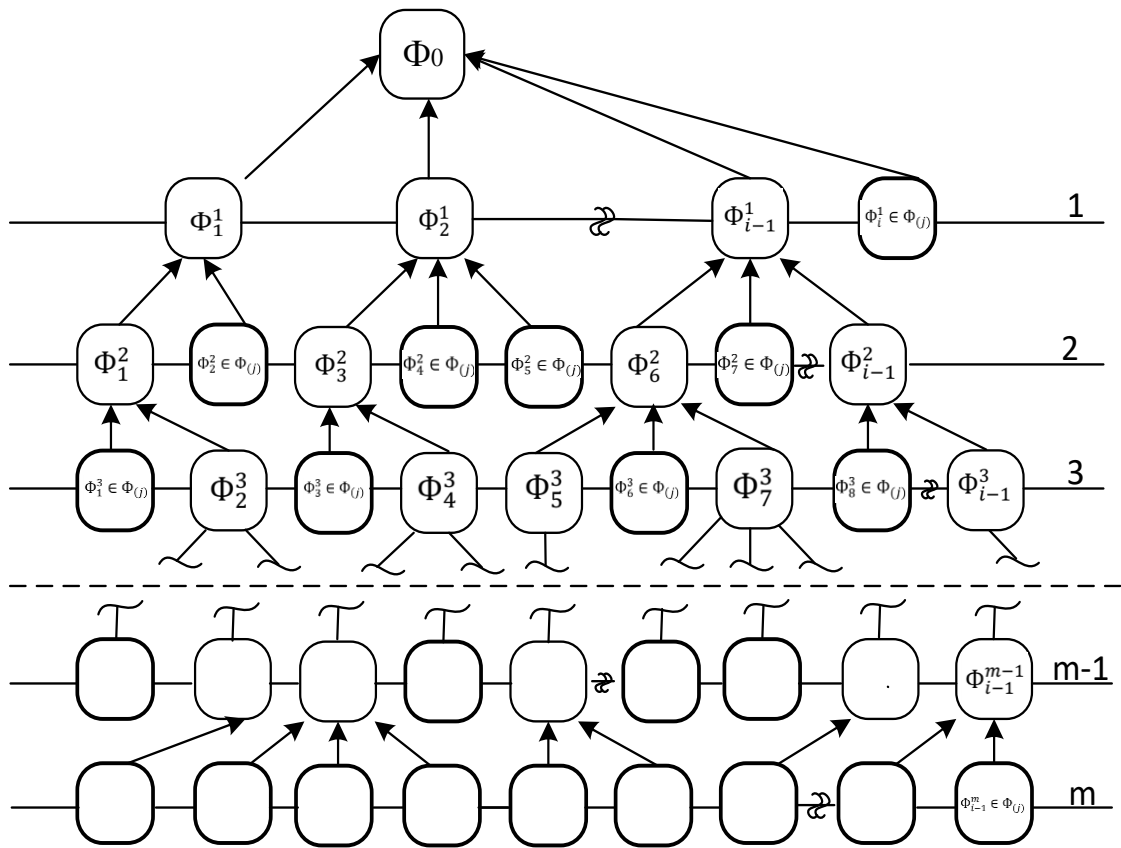


Рисунок 2.4 – Граф реалізації задачі (дерево розв'язків)

Отже, граф складається з гілок рішень – множини вузлів  $S(\Phi_i)$  графа, досяжних з вершини  $\Phi_0$ , для яких, згідно з матрицею досяжності  $D$ , кожен елемент  $\Phi_i$  дорівнює 1.

Якщо вершина графа  $\Phi_0$ , шлях до якої з  $\Phi_i$ , може бути досягнута з використанням шляху довжиною 1, 2, ...,  $m$  етапів, то множину варіантів розв'язків задачі можна подати у вигляді

$$S(\Phi_i) = \Omega\{\Phi_i\} \cup \Omega^2\{\Phi_i\} \cup \dots \cup \Omega^{m-1}\{\Phi_i\} \cup \Omega^m\{\Phi_i\}, \quad (2.8)$$

де  $\Omega^{m-1}\{\Phi_i\}$  – множина вершин графа, які утворюють мости між  $(\Phi_i, \Phi_0)$ .

До того ж необхідною умовою формування множини є співвідношення:

$$\{\Phi_0\} = \cup\{\Phi(j) | \Phi(j) - \text{висяча вершина графа}\}. \quad (2.9)$$



Пошук розв'язків завершується тоді, коли буде розглянуто всі висячі вершини. Ранжування варіантів розв'язків відбувається залежно від довжини шляху (кількості етапів).

Задача структурної оптимізації (найменша кількість методів) у цьому випадку:

$$\Phi_0^{\text{opt}} = \lim_{m \rightarrow 1} \{\Phi_0\}. \quad (2.10)$$

При дотриманні вимог щодо екологічної «чистоти» повітря:

$$K = \text{extr}\{f_0(x, y)\} | x \in D, \quad (2.11)$$

де  $K$  – функція «чистоти»;

$f_0(x, y)$  – критерій оптимізації;

$x$  – параметр керування;

$y$  – постійний параметр процесу;

$D$  – область раціональних значень  $x$ .

## 2.5 Загальна методика проведення досліджень

Для виконання експериментальних досліджень проводилося планування експерименту [349, 350]. Планування експериментальних досліджень спрямовано на отримання максимуму інформації за мінімальних витрат на експериментування.

Експериментальні дослідження як гідродинаміки так і пиловловлення проводилися в наступній послідовності: було зроблено вибір і обґрунтування факторів, що обумовлюють ефективність роботи апаратів з регулярною пульсаційною насадкою, проведено серію експериментів, здійснено обробку

та аналіз отриманих результатів. Визначення параметрів газу для вимірювання пиловловлення здійснювалася повіреними приладами (Додаток Б).

Перед розробкою плану експерименту на основі апріорної інформації були виявлені фактори, які впливають на ефективність роботи пилоочисного апарата. До таких факторів належать:

$L$  - щільність зрошення (витрата рідини),  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$w$  - швидкість газу в апараті,  $\text{м}/\text{с}$ ;

Для визначення оптимальної кількості дослідів та досягнення найвищого ступеня точності й достовірності отриманих результатів, а також обробки цих результатів використано методи математичної статистики. Регресійний аналіз здійснювався на основі експериментальних даних, що отримані при вивченні гідродинаміки та пиловловлення в апараті (Додаток В).

В роботі проведено розробку математичної моделі розсіювання дрібнодисперсного пилу в приземному шарі атмосфери на основі чисельного розв'язку рівняння перенесення речовин в турбулентному шарі методом покоординатного розщеплення, реалізовану в програмному середовищі Maple 2017.0 та компіляторі C++.

В результаті використання методу послідовної ієрархічної кластеризації в програмному середовищі Google-Таблиці та MS Excel отримано програмний алгоритм вибору природоохоронного обладнання, який враховує співставлення інформації трьох баз даних: параметрів забруднюючих речовин, технологічних умов проведення очищення і параметрів природоохоронного обладнання.

### **2.5.1 Опис експериментальної установки**

Під час розроблення процесів та апаратів природоохоронних технологій, необхідними етапами проєктування є побудова початкової моделі, розроблення та перевірка ухвалених рішень на дослідницьких або напівпромислових установках.

Однією з основних проблем при моделюванні і проектуванні масообмінних апаратів є проблема масштабного переходу, яка полягає в зниженні ефективності масообмінного устаткування зі збільшенням його розмірів. Масштабний ефект має складну природу й обумовлений, головним чином, збільшенням нерівномірності розподілу фаз на промисловому контактному пристрої, у порівнянні з лабораторним макетом. З врахуванням вищесказаного, лабораторні дослідження проводилися на укрупненій моделі. Дослідження на укрупнених моделях дають більш надійні результати, які можна безпосередньо використовувати при проектуванні промислових апаратів [351].

Експериментальні дослідження гідродинаміки та пиловловлення ежекційної та форсункової конструкції апаратів з регулярною пульсаційною насадкою (РПН) проводилися на лабораторному стенді за загальною схемою (рис. 2.5).

Стенд для дослідження гідродинаміки та пиловловлення являв собою колону 1 розмірами висота 3000 мм, довжина 400 мм, ширина 300 мм із встановленою провальною тарілкою 2. Висота I зони для проведення процесів взаємодії газу з парорідинною сумішшю становила 1000 мм, висота II зони для дослідження процесів вихроутворення - 2000 мм. В I зону колони є патрубок для подачі рідини (парорідинної суміші) та вище розташовано патрубок для подачі запиленого газу. Передня і задня стінки колони виконані з оргскла, що дозволило провести візуальне спостереження, фотографування та відеозйомку.

Експериментальна установка дозволила проводити дослідження гідродинамічних характеристик та пиловловлення в режимі висхідного прямогоку. Подача повітря на установку здійснювалась відцентровим вентилятором 7 (ВВД-9) в нижню частину колони (I зона). Регулювання витрати газу проводилося шляхом зміни ступеня відкриття засувки 13 та за допомогою комплексу приладів 8 (діафрагма, дифманометр), що встановлені на лінії подачі повітря на установку. Для дозування пилу використовували

саморобний дозатор (трубка зі шнеком), що надходив у патрубок подачі газу (на відстані 1,5 м до приладів регулювання витрати газу).

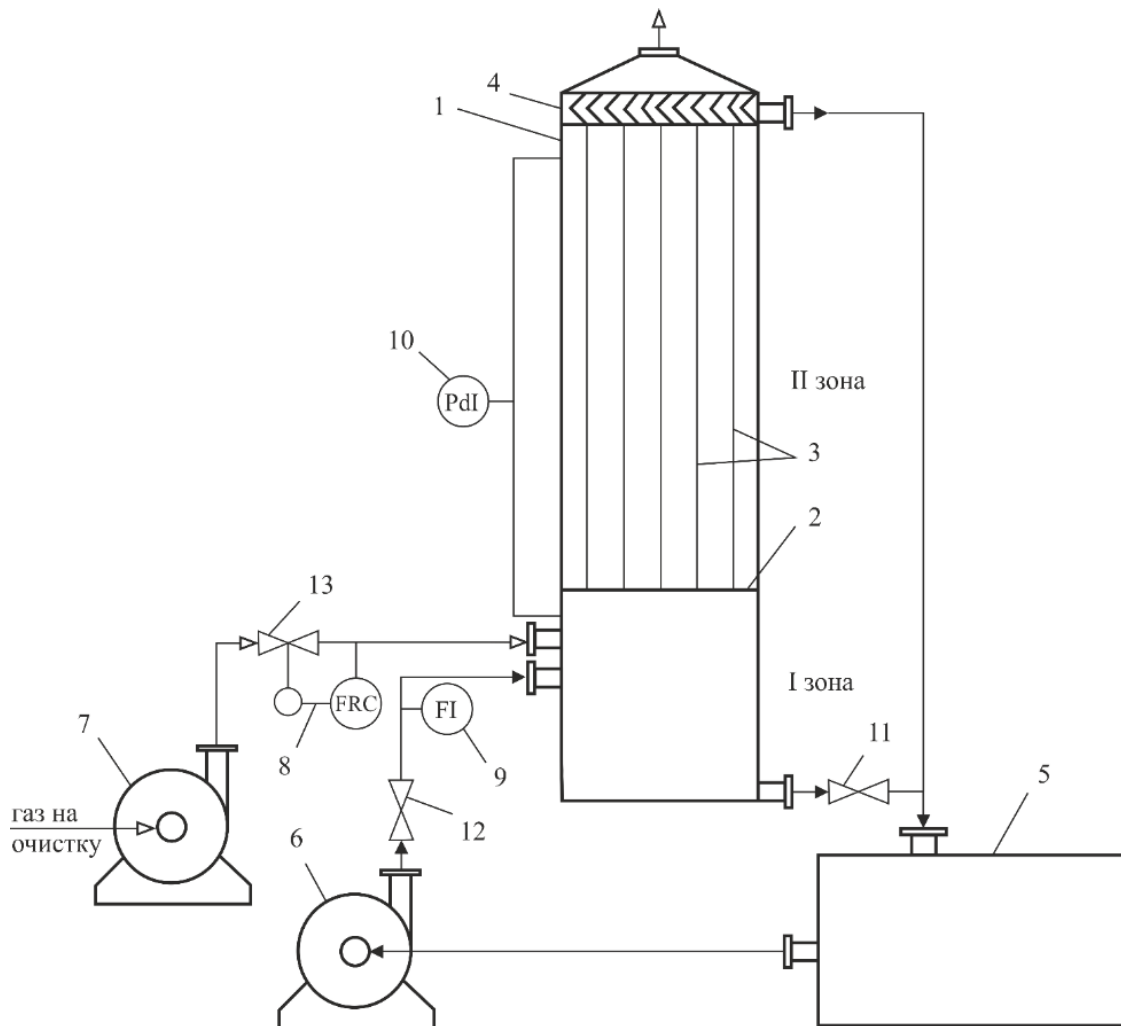


Рисунок 2.5 – Загальна схема експериментальної установки:

1 – колона; 2 – решітка (провальна тарілка); 3 – струни для закріплення елементів насадки; розподільний пристрій для газу; 4 – сепаратор; 5 – ємність для збору, відстоювання і забору рідини; 6 – насос для подачі рідини або парорідинної суміші; 7 – вентилятор; 8 – комплекс приладів для регулювання витрати газу; 9 – ротаметр; 10 – диференціальний манометр; 11, 12, 13 – вентилялі.

Вода на установку надходила з водопровідної мережі через фільтрувальний пристрій робочої ємності 5, далі насосом 6 подавалася в

нижню частину колони до розподільного пристрою. Для вимірювання витрати води використовувався ротаметр 9 (РС-7). Генерація парорідинної суміші здійснювалася у змійовику-випарнику. Рідина, яка проходила по змійовику, нагрівалася від стінок, випаровувалась і у вигляді паро-рідинної суміші насосом подавалася в корпус установки. Регулювання витрати води та парорідинної суміші проводили за допомогою зміни ступеня відкриття вентилі 12.

Під час взаємодії газового потоку, що містить домішки дрібнодисперсних зважених речовин, з рідиною в I зоні колони, реалізується конденсаційний та коагуляційний механізми укрупнення частинок пилу. II зона колони містить струни 3 на яких закріплені пластини для створення розвинутої вихрової взаємодії фаз в апараті. Саме II зона апарату повною мірою реалізує дифузійні та інерційні механізми пилогазоочищення. Очищений від твердих частинок, газовий потік виходить назовні через верх колони. Сепаратор 4 дозволяє уникнути краплевиносу під час роботи апарату. Рідина, що стікала з пластинок на струнах і з поверхні провальної тарілки, виходила через нижню частину колони і потрапляла в робочу ємність 5, звідки після процесу відстоювання насосом 6 подавалася в робочий об'єм колони 1, що дозволило створити циркуляцію рідини по замкнутому контуру.

Обладнаний у такий спосіб дослідний стенд дозволяє проводити дослідження гідродинаміки і механізмів пиловловлення в дослідних конструкціях апаратів з РПН.

### **2.5.2 Методика дослідження гідродинамічних характеристик апаратів**

Дослідження гідродинамічних характеристик апарата включали візуальні спостереження, експерименти з визначення гідравлічного опору і газовмісту газорідинного шару [352, 353].

Дослідження гідродинамічних характеристик пилогазоочисного апарата включає наступні етапи:

1. Підготовка (встановлення лабораторного стенду, підключення систем забезпечення повітрям та водою).
2. Встановлення датчиків контролю (на вході та виході з апарату).
3. Проведення експериментів (робота апарата на різних режимах і вимірювання параметрів тиску під час роботи).
4. Аналіз результатів (регресійний аналіз та інші статистичні методи).
5. Висновки проведених досліджень (висновки та рекомендації щодо вдосконалення роботи пилогазоочисного апарата).

Гідравлічний опір колони вимірювали диференціальним манометром 10 (ДСЕН-МІ 0-5 мА), з вихідним електричним сигналом, підключеним до вторинного приладу з диференційно-трансформаторною вимірювальною схемою. Робота приладу базується на вимірюванні різниці тиску між двома точками в апараті.

Загальний газовміст в колоні вимірювали методом відсічення через співвідношення висоти газорідинного шару та висоти шару рідини на провальній тарілці (фіксуєча решітка) за формулою:

$$\varphi = \frac{(H - h)}{H}, \quad (2.12)$$

де  $\varphi$  – газовміст газорідинного шару;

$H$  – висота газорідинного шару (контактної зони з пластинками на струнах), м;

$h$  – висота шару рідини на тарілці, м.

Локальний газовміст досліджували електроконтактним методом [354, 355]. Реєстраційна система складалася з вимірювального зонда і первинного приладу марки ІГС-2, підключеного до цифрового осцилографа і персонального комп'ютера. Зонд складався з трубчастого контактного і

голчастого електродів. Фіксуючий електрод зроблений з покритою лаковою ізоляцією манганінового дроту діаметром 0,2 мм, коаксіально закріпленого в трубчастому електроді лаковим ізолюючим наповнювачем. При цьому неізольований торець фіксуючого електрода виступав за межі трубчастого на 15 мм. Контактний електрод виконувався з бронзової трубки діаметром 0,8 мм з плавно загнутим на 90° наконечником довжиною 25 мм. Датчик мав можливість переміщення по висоті газорідного шару та площі поперечного перерізу апарата.

Інструментами для візуалізації та документування дослідження гідродинамічних характеристик пилогазоочисного апарата є фото- та відеозйомка. За допомогою фото- та відеозйомки спостерігали поведінку і структуру газорідного шару, виявляли режими руху фаз, визначали вихрову поведінку газорідного шару.

### 2.5.3 Методика дослідження пилоочищення

Дослідження пилоочищення в апараті з РПН містило в собі визначення ефективності дифузійного й інерційного пилоосадження.

Дисперсний склад вмісту пилу визначено за допомогою попереднього лабораторного дослідження в лабораторії ПАТ «Сумихімпром» за допомогою приладу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 [356]. Принцип виміру базується на різній швидкості седиментації частинок пилу в гліцерині під дією відцентрової сили, з подальшим комп'ютерним аналізом.

Дослідження ефективності пилоочищення проводилося шляхом розрахунків показника ефективності по Мерфі

$$\eta = (G_{\text{кін}}/G_{\text{поч}}) \cdot 100\%, \quad (2.13)$$

де  $G_{\text{поч}}$  – масова витрата пилу на вході в апарат, г/с;

$G_{\text{кін}}$  – масова витрата пилу на виході з апарату, г/с.

При вимірюванні концентрації пилу на виході з апарату, використовували гравіметричний метод у відповідності з «Методикою виконання вимірювань масової концентрації речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (пилу) в організованих викидах стаціонарних джерел гравіметричним методом при температурі газопилового потоку до 600 °С (МВВ)» [357].

МВВ забезпечує виконання вимірювань масової концентрації пилу в організованих викидах промислових стаціонарних джерел у діапазоні від 1,0 до 10000 мг/м<sup>3</sup> включно із границями сумарної відносної похибки,  $\delta$ ,  $\pm 15$  %, що відповідає вимогам РД 52.04.59.

Результатам визначення концентрації пилу на виході з апарату передували попередні заміри параметрів газопилового потоку.

На початку проводили вимірювання параметрів газопилового потоку:

– швидкості (ГОСТ 17.2.4.06-90), повного та статичного тиску до та після контактної пристрою (ГОСТ 17.2.4.07-90);

– температури газопилового потоку (ГОСТ 17.2.4.07-90) та вологості (ГОСТ 17.2.4.08-90).

Для виміру швидкості та тиску у конструкції лабораторної установки наявні спеціальні місця доступу в які вводяться пневмометричні (напірні) трубки НДЮГаз, до яких трубками під'єднано цифровий мікроманометр ММЦ-200, що дає змогу визначити не лише динамічний тиск, а й швидкість газового потоку. Похибка вимірів становить не більше  $\pm 1\%$ .

Температуру і вологість визначали за допомогою контактної цифрової термометра ТК-5.06.

Після визначення параметрів газового потоку використовуємо зонд для забору пилу методом зовнішньої фільтрації зі змінними наконечниками. У якості фільтрувального матеріалу, до температур +60°C, використовують аерозольні фільтри АФА-ВП.

Зібраний зонд вводили в газохід, через спеціально підготовлені отвори в верхній частині газоходу, з'єднували полімерними трубками з аспіраційним пристроєм, на ротаметрі якого встановлювали об'ємну витрату повітря, та



вимірювали температуру та розрідження газу перед ротаметром. Тривалість відбору однієї проби має становити 20 хв. По закінченні часу відбору проби дістали зонд із газоходу. Після очищення зонду виконали заміну фільтра для наступного відбору.

Використані фільтри згортали навпіл запиленою стороною всередину, обережно поклали кожний у пакет із кальки, який, в свою чергу, вклали у поліетиленовий пакет. Після висушування виміряли маси фільтруючих елементів із відібраними пробями пилу: фільтри з відібраними пробями та контрольні фільтри. Отримані результати дозволили визначити концентрацію і масову витрату пилу на виході з апарату.

Вимірювання масової концентрації пилу двоокису титану на вході в апарат проводили виходячи з об'ємної витрати повітря та пилу через спеціально розроблений пристрій-дозатор.

#### **2.5.4 Методика відбору проб пилу в СЗЗ**

Для відбору проб повітря на вміст пилу використовували гравіметричний метод з застосуванням електроаспіратора і фільтрувального патрону. У якості аспіраційного приладу використовували аспіратор М 822, який відповідає параметрам вимірюваного середовища. Аспіратор працює від джерела живлення 220 вольт, тому для проведення відбору проб у польових умовах використовували автомобільний акумулятор з перетворювачем напруги 12/220 вольт. Тривалість відбору проб складала 20 хвилин. У якості фільтрувального матеріалу використовували фільтри АФА-ВП.

Так як передбачалася серія замірів, використовували декілька комплектів фільтрів. Кожен використаний фільтр окремо поміщали в поліетиленову тару для подальшого зважування в лабораторних умовах. За результатами вимірів приросту ваги фільтрів мали змогу розрахувати запиленість повітря в межах СЗЗ.

### **2.5.5 Методика проведення мікроскопічних досліджень пилю**

Для дослідження елементного складу пилю на межі СЗЗ також використовували електронний мікроскоп. Растрова електронна мікроскопія з рентгенівським мікроаналізом була реалізована на приладі РЕММА-102 (SELMI, Україна). Прилад дозволяє візуалізувати поверхню зразка в широкому діапазоні збільшень із дозволом порядку 10 нм і одержувати дані про елементний склад з аналізу характеристичних рентгенівських спектрів, порушуваних електронним зондом. Взаємодія електронів з атомами зразка створює сигнали, що несуть інформацію про рельєф поверхні, склад і структуру об'єкта дослідження

Вторинні електрони забезпечують максимальну в порівнянні з іншими сигналами роздільну здатність порядку 5...10 нм. Тому вони є в РЕМ головним джерелом інформації для одержання зображення поверхні об'єкта. Кількість вторинних електронів, що утворюються слабо залежить від атомного номера елемента.

В режимі мікроаналізу з використанням енергодисперсійного спектрометра EDX (ЕДАР), аналітичний сигнал накопичується на обраних точках поверхні зразка; для калібрування використовувались стандартні еталонні зразки, які йдуть в комплектації. Обробка спектрометричної інформації, виконання необхідних калібрувальних вимірювань, розшифровка характеристичних рентгенівських спектрів, якісний і кількісний аналіз проводилися за допомогою програмного забезпечення системи мікроаналізу.

### **2.5.6 Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Оцінка впливу похибок замірів на результати досліджень**

Безпосередньо планування експерименту, постановка завдання дослідження і отримання його результатів пов'язані зі зміною різних фізичних і чисельних значень величин. Під час проведення широкого спектру

досліджень технологічних процесів спостерігається наявність похибок на різних стадіях його проведення і прийняття фінальних рішень.

Якість засобів і результатів вимірювань прийнято характеризувати зазначенням їх похибки. Одна з основних вимог до проведення якісного і достовірного експерименту – висока точність використовуваних приладів для вимірювання [358].

Визначення похибки вимірювань та результатів розрахунку основних гідродинамічних та пилотуючих характеристик експериментального установок дослідних стендів базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях [359, 360] щодо проведення інженерного експерименту та обробки отриманих даних.

Для визначення оптимальної кількості дослідів та досягнення найвищого ступеня точності й достовірності отриманих результатів, а також обробки цих результатів використано методи математичної статистики [361–363].

Під час проведення експерименту можливе виникнення двох типів помилок – випадкових та систематичних.

Випадкові помилки зменшують точність результатів експерименту. Аналіз такого типу помилок можливий за умови використання середньоквадратичного відхилення  $\sigma$ , що обчислюється за такою формулою [364]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (2.14)$$

де  $\bar{x}$  – середнє арифметичне значення;

$x_i$  – значення одиничного параметра;

$n$  – число вимірів.

Найбільша можлива помилка окремого вимірювання визначається за правилом трьох сигм [365]

$$\Delta = 3\sigma. \quad (2.15)$$

Двосторонній довірчий інтервал середнього арифметичного значення  $\varepsilon$  визначали за залежністю [365] за умови ймовірності його потрапляння в довірчий інтервал 95%

$$\varepsilon = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.16)$$

де  $t_p$  – критерій Стьюдента.

Середньоквадратична похибка непрямих вимірювань [365]

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}, \quad (2.17)$$

де  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Точність отриманих рівнянь регресії визначена за методикою найменших квадратів [366].

Систематичні помилки зміщують однаковою мірою всі показники величин, які контролюються в ході проведення експерименту. Для виключення помилок такого типу усі прилади, що були використані під час проведення досліджень, пройшли тарування в спеціалізованій лабораторії за допомогою зразкових приладів в умовах проходження експерименту. При цьому погрішність вимірів визначалася класом точності засобів виміру. Дані про точність вимірювання робочих параметрів приведені в (табл. 2.3).

Максимальна відносна похибка вимірювання концентрації пилу в дослідних конструкціях апаратів та на межі СЗЗ складає 15% за умови ймовірності його потрапляння в довірчий інтервал 95%, що дозволяється відповідно методики [357].

Таблиця 2.3 - Точність виміру робочих параметрів

Досліджуваний параметр	Вимірювальні прилади	Клас точності засобів вимірювання, %.	Клас точності вимірювання, %.
Гідравлічний опір	ДМ 3583М	0,5	1,0
	КСД 3	0,5	
	ДК6-160;	1,0	
Витрата повітря	ДМ 3583М	0,5	2,0
	КСД 3	0,5	
Витрата пари	ДМ 3583М	0,5	2,0
	КСД 3	0,5	
Витрата рідини	РЭВ-0,04ЖУЗ	2,5	3,0
	КСД 3	0,5	

## 2.6 Висновки та узагальнення до розділу 2

У розділі 2 «Методи й методика системного аналізу об'єкту дослідження» одержано такі результати:

1. Наведено загальну схему системного аналізу для вирішення поставлених задач дослідження, зокрема визначено систему «викиди виробництва – природозахисне обладнання – зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище», що дозволяє досягти вирішення задачі щодо зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище промислових виробництв, викиди яких містять дрібнодисперсні зважені речовини. Методика та методи проведення системного аналізу зорієнтовані на застосування математичного моделювання, оцінювання екологічного ризику для підвищення ефективності ліквідації та локалізації аварійних ситуацій.

2. Предметно проаналізовано об'єкт дослідження та надано характеристику досліджуваному дрібнодисперсному пилу як техногенних чинників формування екологічної безпеки підприємства. Встановлено, що пил є дрібнодисперсним та має високі адгезійні властивості.

3. Обґрунтовано методики аналізу і спрощення інформації для побудови алгоритмів вибору обладнання і проведення параметризованої оптимізації. Встановлено, що методика дослідження алгоритму вибору природоохоронного обладнання ґрунтується на дослідженні синтезу даних баз параметрів забруднюючих речовин, технологічних умов проведення процесу і параметрів природоохоронного обладнання.

4. Розроблено конструкцію лабораторного стенду для вивчення гідродинамічних та пиловловлюючих характеристик апарату з РПН. Описані методи дослідження гідродинаміки, пиловловлення та відбору проб на межі СЗЗ.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [130, 344, 352, 353].

### РОЗДІЛ 3

## СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ЗВАЖЕНИХ РЕЧОВИН

### 3.1 Кореляційно-регресійний аналіз дослідження впливу дрібнодисперсного пилу на здоров'я людини

Необхідність дослідження впливу пилу на здоров'я людини дозволяє краще зрозуміти механізми, які стоять за забрудненням повітря та виявити ефективні методи боротьби з цією проблемою.

Для дослідження і вивчення впливу викидів дрібнодисперсного пилу на здоров'я населення та встановлення взаємозв'язку між обсягами викидів та кількістю захворювань систем кровообігу в нашій країні, проведено кореляційно-регресійний аналіз взаємозв'язку між факторами (X, N) і результатом (Y). Використання цього методу дозволяє визначити, наскільки сильним є зв'язок між змінними та як одна змінна впливає на іншу.

Кореляційно-регресійний аналіз проводили з використанням вбудованих функцій програмного продукту MS Excel (Microsoft Office), при цьому були використані наступні позначення:

N – загальна чисельність населення в країні, осіб;

X – обсяги викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферне повітря, тис. т;

Y – кількість випадків захворювань, осіб.

З метою виключення впливу випадкових факторів (економічні, соціальні та ін.) замість абсолютних обсягів викидів суспендованих твердих частинок в атмосферу, прийнято узагальнений показник – викиди твердих частинок у розрахунку на одну особу (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Математично-статистичне вивчення впливу пилу на систему кровообігу людини

Рік	Обсяги викидів суспендованих твердих частинок, кг/особу			Чисельність населення, тис. осіб	Зареєстровано випадків хвороб систем кровообігу, тис. випадків			
	усього	< 2,5 мкм	2,5-10 мкм		факт	модель		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$N$		$Y$	$Y_m(X_1)$	$Y_m(X_2)$
2014	9,360	1,971	0,559	45426,2	1880	1883	1880	1886
2015	8,176	1,588	0,461	42929,3	1820	1810	1792	1825
2016	9,294	1,717	0,801	42760,5	1826	1826	1789	1809
2017	7,538	1,104	0,319	42584,5	1781	1791	1770	1775
2018	7,491	1,276	0,5	42386,4	1780	1786	1768	1776
2019	7,361	1,559	0,584	42153,2	1770	1779	1767	1772
2020	5,941	1,321	0,533	41902,4	1760	1749	1753	1761
2021	6,321	1,678	0,538	41588,4	1747	1749	1751	1750

За даними таблиці 3.1 проведено кореляційно-регресійний аналіз взаємозв'язку між факторами впливу ( $X_i$  – обсяги викидів твердих часток на одну особу, з урахуванням розміру твердих часток) та результатом їх впливу ( $Y$  – випадки зареєстрованих хвороб систем кровообігу на території розповсюдження суспендованих твердих частинок). Метою є побудова математичної моделі, яка описує залежність змінними. Для урахування максимально можливого числа людей, які безпосередньо піддаються небезпеці, що в певній мірі визначає обсяг і масштаби прояву хвороб систем кровообігу, за додатковий фактор прийнято загальну чисельність населення в країні ( $N$ ) [341].

В результаті проведеного кореляційно-регресійного аналізу було побудовано математичні моделі, які описують залежність між чисельністю населення, обсягами викиду різного за дисперсністю пилу та кількістю захворювань у звітний період часу, що дозволяє прогнозувати рівень захворюваності населення за різних рівнів пилу в повітрі. (рис. 3.1–3.3).



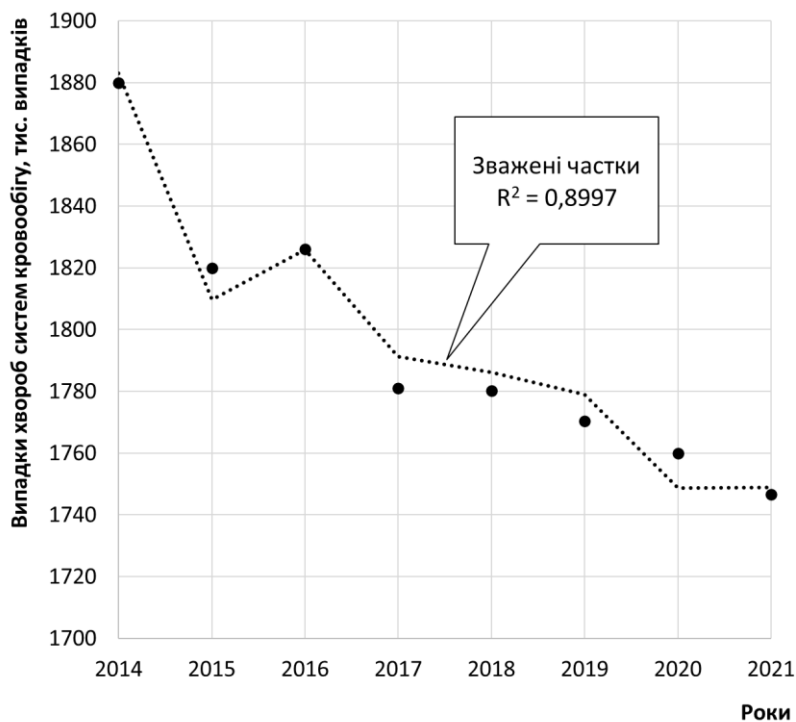


Рисунок 3.1 – Інтенсивність прояву хвороб систем кровообігу від викидів зважених речовин (точки – фактичні дані, лінія – модель)

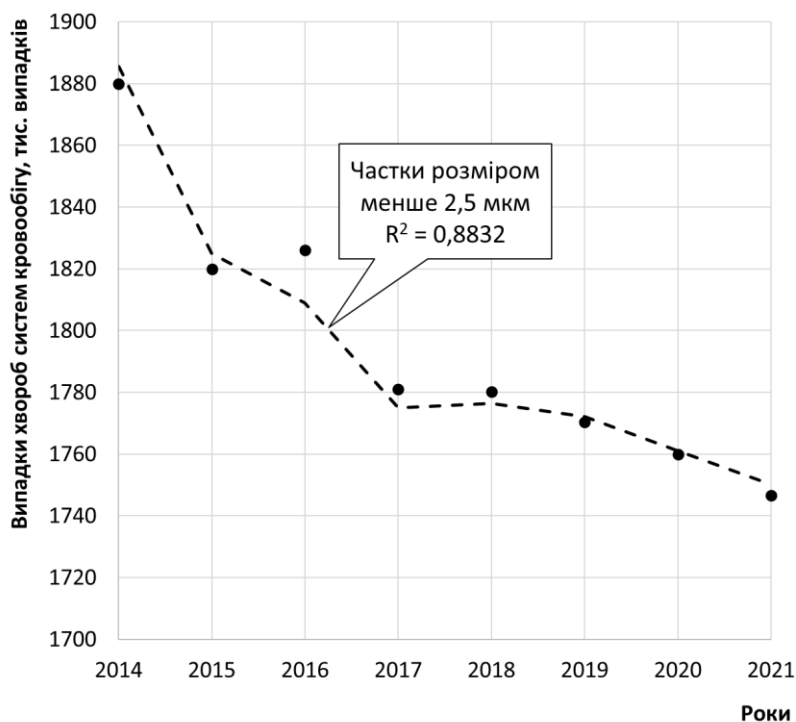


Рисунок 3.2 – Інтенсивність прояву хвороб систем кровообігу від викидів зважених речовин розміром менше 2,5 мкм (точки – фактичні дані, лінія – модель)

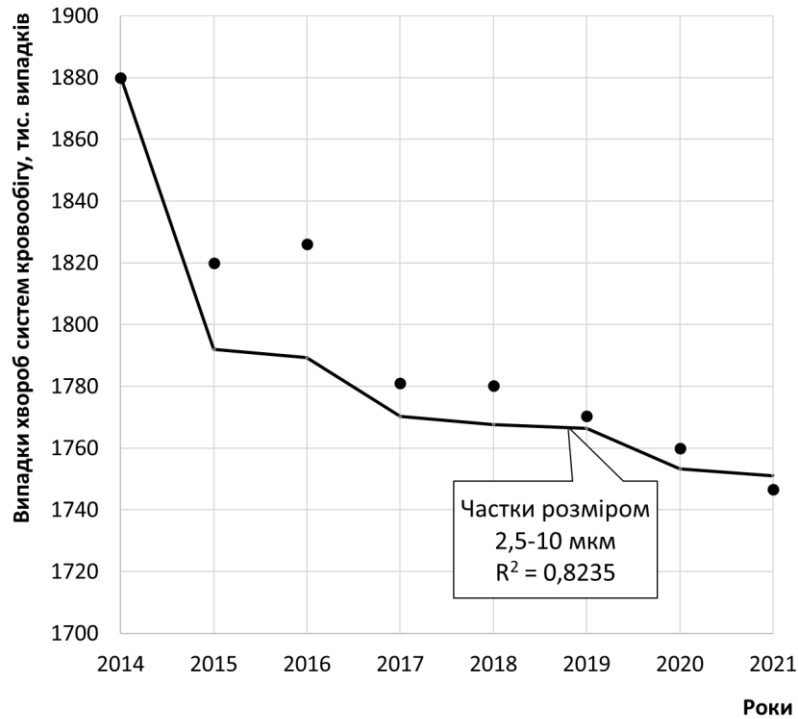


Рисунок 3.3 – Інтенсивність прояву хвороб систем кровообігу від викидів  
зважених речовин розміром 2,5–10 мкм  
(точки – фактичні дані, лінія – модель)

В результаті аналізу графічних даних інтенсивності прояву хвороб систем кровообігу залежно від розміру дрібнодисперсного пилу отримано наступні моделі:

для загальної кількості зважених речовин

$$Y_m = 763,979 + 0,021 \cdot N + 17,644 \cdot X_1, \quad (3.1)$$

для частинок розміром 2,5 – 10 мкм

$$Y_m = 383,129 + 0,032 \cdot N + 22,129 \cdot X_2, \quad (3.2)$$

для частинок розміром менше 2,5 мкм

$$Y_m = 269,771 + 0,035 \cdot N + 46,244 \cdot X_3. \quad (3.3)$$

Одержані регресійні залежності пройшли перевірку адекватності, шляхом порівнянням кількості випадків хвороб систем кровообігу, розрахованих відповідно до отриманих моделей ( $Y_m$ ), з фактично зареєстрованими даними по країні ( $Y$ ).

При проведенні розрахунку визначається коефіцієнт детермінації, який вказує на скільки процентів варіація результативного показника ( $Y$ ) обумовлюється варіацією факторного показника ( $X$ ). Цей показник набуває значень від  $-1$  до  $+1$ . За його від'ємного значення наявний обернений зв'язок, а за додатного – прямий. Коефіцієнт детермінації показує, наскільки сильним є зв'язок між двома змінними. Якщо коефіцієнт кореляції близький до  $1$ , то змінні мають сильний позитивний зв'язок, тобто зі збільшенням значення однієї змінної зростає і значення іншої змінної. Якщо коефіцієнт кореляції близький до  $-1$ , то змінні мають сильний негативний зв'язок, тобто зі збільшенням значення однієї змінної зменшується значення іншої змінної. Якщо коефіцієнт кореляції близький до  $0$ , то змінні мають слабкий зв'язок між собою.

Невисока розбіжність між фактичними статистичними даними та даними модельного розрахунку, свідчить про наявність дуже сильної залежності захворюваності систем кровообігу населення від викидів дрібнодисперсного пилу. На ці результати варто звернути увагу, оскільки проблема викидів пилу в атмосферу є актуальною, а наведені результати дослідження свідчать про підтверджений ризик здоров'ю та життю населення.

Порівняльний аналіз відповідних коефіцієнтів детермінації, дозволив встановити високу небезпеку впливу твердих часток розміром менше  $2,5$  мкм на систему кровообігу. Так коефіцієнт детермінації ( $R^2=0,8832$ ), свідчить про те що динаміка захворюваності систем кровообігу населення країни на  $88,3$  % обумовлена варіацією обсягів викидів твердих частинок розміром до  $2,5$  мкм у розрахунку на одну особу. В свою чергу результати проведеного моделювання впливу твердих часток розміром від  $2,5$  до  $10$  мкм на захворюваність населення вказують на те що вплив таких домішок є порівняно

нижчим. Коефіцієнт детермінації на рівні 0,8235 свідчить про наявність слабшого зв'язку між викидами твердих часток розміром від 2,5 до 10 мкм та захворюваністю на хвороби системи кровообігу.

Порівняльний аналіз одержаних результатів дозволив встановити, що захворюваність людини на хвороби системи кровообігу в більшій мірі викликана викидами твердих часток розміром до 2,5 мкм. Отримані результати потребують розробки заходів щодо зниження викидів  $PM_{2.5}$  в приземному шарі атмосфери. Заходи зниження техногенного впливу від викидів  $PM_{2.5}$  можуть бути представлені технічними та інструментальними засобами, прогнозуванням поширення викидів та реалізацією громадського контролю через інформування громадськості на різних рівнях.

З огляду на те, що в Україні не має нормування пилу в залежності від дисперсного складу, то відповідно під час організації та проектування потенційних джерел викидів ризик для здоров'я населення, яке проживає в зоні впливу промислових підприємств не розглядається. Це, своєю чергою, вимагає достовірних оцінок та вивчення закономірностей поширення викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини. Реалізація заходів громадського контролю якості атмосферного повітря вимагає створення спеціальних програмних застосунків, які дозволяють забезпечити прозорість та відповідальність з боку підприємств, а також допоможе населенню приймати інформовані рішення щодо захисту свого здоров'я та довкілля.

## **3.2 Моделювання розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин в приземному шарі атмосфери**

### **3.2.1 Основи побудови чисельної математичної моделі**

Аналіз антропогенного впливу на природні екосистеми вказує на те, що темпи деградації довкілля в Україні досягли таких розмірів, що перевищують швидкість біологічної адаптації живих організмів до навколишнього

середовища, фактично – втрачена стабільність екосистем. Якщо прийняти здоров'я населення як кумулятивний показник антропогенного «тиску» на навколишнє середовище, то статистичні методичні дані свідчать про зростання впливу екологічних факторів на фізичний потенціал нашого суспільства [367]. Однією із центральних проблем сучасних досліджень атмосферного повітря є математичне моделювання мінливості газового та аерозольного складу атмосфери, а також оцінка впливу атмосферних домішок на навколишнє середовище.

Розробка та впровадження моделей поширення забруднюючих речовин в атмосфері є важливою задачею на шляху до Євроінтеграції законодавчо-нормативної бази України згідно Директиви 2010/75/ЄС. Математичні моделі, що враховують прогнозу зони впливу і дальність поширення забруднюючих речовин можуть використовуватись для:

1. Оцінки техногенного впливу на здоров'я людини і стан навколишнього природного середовища.
2. Прогнозування кліматичних змін (забруднення повітря впливає на зміну температури, швидкість вітру та інші кліматичні показники).
3. Розробки стратегій боротьби з забрудненням повітря (прогнозування ефективності заходів із зменшення викидів забруднюючих речовин, енергоефективності промислового виробництва).
4. Оперативного реагування на надзвичайні ситуації (пожежі, аварії на промислових об'єктах).
5. Інформування громадськості щодо викидів промислових підприємств, що допоможе забезпечити більшу прозорість та відповідальність з боку підприємств, а також допоможе населенню приймати інформовані рішення щодо захисту свого здоров'я та довкілля.

Атмосфера є складною динамічною системою, в якій протікають різні динамічні та фізико-хімічні процеси. Ці процеси обумовлені як атмосферою циркуляцією, і трансформацією газових і аерозольних домішок. Поширення забруднюючих речовин в атмосфері відбувається під дією вітру (турбулентних

і конвекційних повітряних потоків) з урахуванням їх флуктуацій в шарі повітря. Середній потік забруднюючих речовин, що переноситься повітряними масами, як правило, має адвективну та конвективну складові. Середні флуктуації частинок можна інтерпретувати як дифузію по відношенню до фону пов'язаного з нею основного середнього руху. Якщо подивитися на факел від джерела викиду, то, по-перше, відбувається захоплення факелу потоком повітря і, по-друге, поступове поширення цього факела на відстань від джерела за рахунок дрібномасштабної турбулентності. В результаті факел має форму витягнутого конуса, який розширюється в напрямку руху повітряних мас. Зростаючи під впливом великих турбулентних коливань, факел розпадається на ізольовані вихрові утворення, які захоплюються повітряними масами і поширюються на велику відстань від джерела викидів.

Прогноз та контроль забруднення повітряного шару є невід'ємною частиною моніторингу навколишнього середовища у зонах впливу техногенних джерел викидів. Розробка та застосування математичного забезпечення з використанням чисельного моделювання є перспективним напрямом (з можливістю вдосконалення) для достовірного прогнозування екологічного стану приземного шару атмосфери промислових зон та населених пунктів.

Враховуючи літературний огляд, наведений у п. 1.7, актуальною задачею є розробка чисельної моделі поширення дрібнодисперсних речовин в приземному шарі атмосфери з врахуванням умов і параметрів джерел викидів, сили і напрямку вітру, турбулентності повітряних мас. Якщо домішки, що викидаються в атмосферу, складаються з великих частинок, то поширюючись в атмосфері, великі частинки під дією сили тяжіння починають осідати з певною постійною швидкістю відповідно до закону Стокса. Майже усі домішки в результаті осідають на поверхні землі, причому важкі осідають переважно під дією гравітаційного поля поблизу джерела, а легкі – в результаті процесу турбулентної дифузії на більшій відстані від джерела. Гравітаційний

потік для важких частинок значно вищий за дифузію, тоді як для легких домішок він майже непомітний.

Модель із спрощеним програмно-алгоритмічним забезпеченням, зручним і зрозумілим у використанні, знайде застосування в системах прогнозування техногенного навантаження на довкілля. Це дає можливість оперативного вирішення природоохоронних завдань з оцінки впливу певного об'єкта на атмосферу.

Поширення забруднюючих речовин в атмосфері від джерела викидів відбувається в цілому за законами матеріального світу, які здебільшого відомі науці в різних її галузях (фізиці, хімії, кліматології, теорії випадкових процесів тощо). (навчальний посібник Локальні моделі)

Умови, які впливають на цей процес, умовно можна поділити на такі групи (фактори впливу):

- параметри джерела;
- параметри викиду пилогазоповітряної суміші;
- умови виходу факела з отвору джерела;
- характеристики атмосферного повітря в зоні викиду та характеристики підстилаючої поверхні землі.

Багато процесів трансформації газових домішок та аерозолів протікають у турбулентній атмосфері. Товщина шару повітря, в якому відбувається розсіяння домішки від промислового підприємства, може бути дуже значною, особливо у випадках потужних джерел з висотою труб 100-200 м, викиди від яких поширюються на великі відстані.

Процес поширення забруднюючих речовин в нижній частині атмосфери залежить від ефективного переміщення повітряних мас і дифузії. Ці процеси виникають через створення нелінійних фрактальних повітряних пульсацій, які можуть бути описані за допомогою моделей турбулентності. В загальному випадку, всі домішки поступово випадають на поверхню Землі. Важкі домішки випадають через дію гравітації, тоді як легкі домішки осідають в результаті дифузійних процесів. Крім того можливе сухе та вологе осадження

забруднюючих речовин в атмосфері. Характеристики забруднюючих речовин та їх просторово-часовий розподіл залежатимуть переважно від особливостей об'єктів промислової інфраструктури, які є джерелами викидів. Так, однією з головних особливостей стаціонарних джерел забруднення є те, що їх викиди в атмосферу здійснюються на висоті, що може призвести до поширення забруднюючих речовин на великі відстані і охоплення значних територій залежно від висоти викиду. Взаємодіючи між собою, ці зони можуть створювати області стійких забруднень в промислових районах міст. Сучасні моделі поширення забруднюючих речовин можуть бути напівемпіричними залежностями, які є справедливими лише для конкретних ситуацій та компонувань забудови, що були передбачені при постановці експерименту, або вони можуть використовувати математичну статистику для обробки натурних вимірів.

На рис. 3.4 зображено можливі варіації властивостей доміантних повітряних фаз, які мають випадковий характер і впливають на процес перенесення забруднюючих речовин в атмосфері.

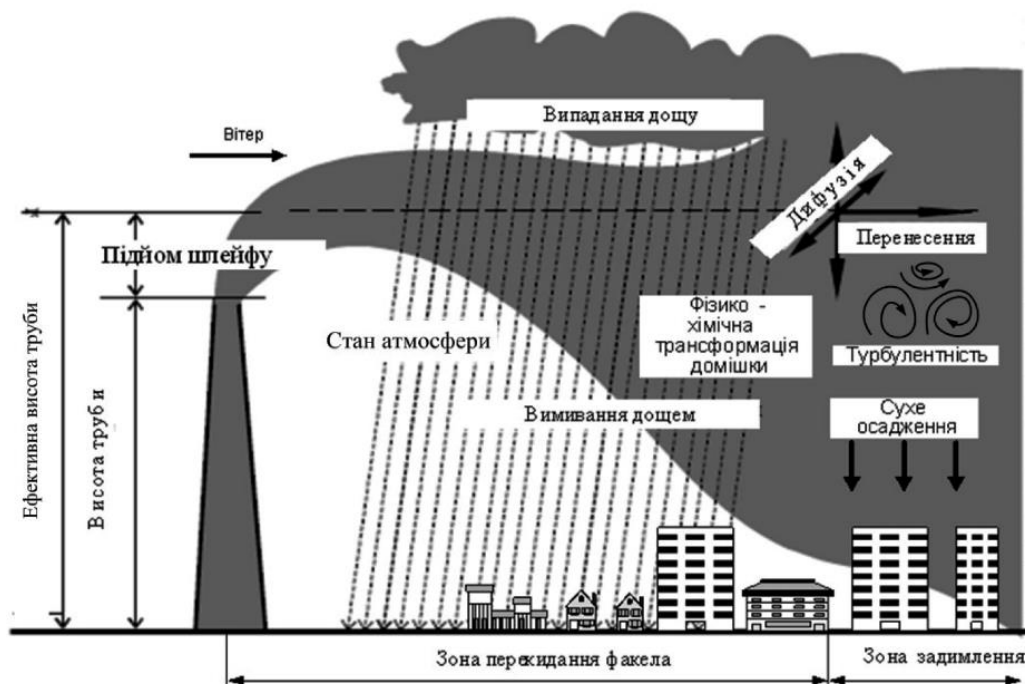


Рисунок 3.4 – Особливості розповсюдження ЗР в атмосфері внаслідок викиду техногенного джерела



Флуктуації швидкості та напрямок вітру є важливими чинниками в теорії поширення різноманітних забруднюючих речовин в атмосфері. Це підкреслює необхідність урахування комплексу факторів при моделюванні процесу розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері.

Передумовою побудови математичної моделі було вирішення наступних завдань:

– дослідження проблеми невизначеності вихідних даних математичної моделі параметризованого рівняння перенесення забруднюючих речовин в атмосфері;

– одержання аналітичних розв’язків та побудови відповідних алгоритмів чисельного моделювання процесу розсіювання забруднюючих речовин (відповідні ітераційні та рекурсивні обчислювальні алгоритми);

– розроблення алгоритмів та програмної реалізації моделі розсіювання для забезпечення прогнозування рівнів забруднення приземного шару атмосфери дрібнодисперсними зваженими речовинами.

Врахування параметрів атмосферної турбулентної дифузії, що впливає на процес розсіювання домішок, визначається за допомогою систем рівнянь або емпіричних даних (моделі Гаусса) з використанням граничних умов і вхідних параметрів. Тому, щоб відтворити просторово-часову мінливість полів метеоелементів та турбулентних характеристик атмосфери, розв’язання задачі про розповсюдження домішок необхідно проводити спільно з гідродинамічними моделями. Це особливо важливо для процесів у мезомасштабі. Сформулюємо основні рівняння гідродинамічної моделі мезомасштабних атмосферних процесів.

Система рівнянь дифузійного поширення дрібнодисперсних речовин у турбулентному приземному шарі атмосфери базується на [368–371]:

– рівнянні Нав’є-Стокса

$$\frac{\partial v_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}(v_j)) - g, \quad (3.4)$$

де  $v_j$  – проєкції компонентів швидкості на вісь  $Ox_j$ ;

$t$  – час;

$\rho$  – щільність забруднюючої речовини;

$p$  – атмосферний тиск;

$\mu$  – динамічна в'язкість повітря;

$x_j$  – відстань від джерела;

$g$  – прискорення вільного падіння;

– рівнянні масоперенесення забруднюючих речовин

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}(\varphi_i)) + I_\varphi, \quad (3.5)$$

де  $\varphi_i$  – об'ємні частки  $i$ -ї фази ( $i=0$  – повітря,  $i=1$  – вода у газоподібному стані,  $i=2$  – газ на джерелі викиду,  $i=3$  – вода у рідкому стані,  $i=4$  – сажа);

$t$  – час;

$\mu$  – динамічна в'язкість повітря;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$I_\varphi$  – флуктуаційна об'ємна складова;

– рівнянні теплоперенесення

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}(Q)) + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}(T)) + I_Q, \quad (3.6)$$

де  $Q$  – кількість теплової енергії;

$t$  – час;

$\mu$  – динамічна в'язкість повітря;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$T$  – температура газової фази;

$I_Q$  – флуктуаційна складова тепла;

– а також враховується умова нерозривності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho \bar{v}) + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}(\rho)) + I_{\rho}, \quad (3.7)$$

де  $\rho$  – щільність забруднюючої речовини;

$t$  – час;

$v$  – швидкість потоку;

$\mu$  – динамічна в'язкість повітря;

$I_{\rho}$  – флуктуаційна складова щільності забруднюючих речовин;

– та рівняння стану

$$P = \sum_i \frac{\rho_i}{M_i} RT, \quad (3.8)$$

де  $P$  – тиск;

$\rho$  – щільність  $i$ -ї газової суміші;

$T$  – температура газової фази;

$M$  – молярна маса  $i$ -ї газової суміші;

$R$  – універсальна газова стала.

Рівняння (3.4) – (3.7) можуть бути модифіковані та доповнені в залежності від конкретних аспектів моделювання атмосферних процесів поширення забруднюючих речовин.

Розглянемо чисельний метод розв'язання рівнянь (3.4) – (3.8). Алгоритм розрахунку має вигляд:

1. Чисельне визначення меж існування початкових і граничних умов на основі даних викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферу.
2. Розрахунок значень розподілу на основі векторного рівняння Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності і рівняння Клапейрона.
3. Оцінка значень поля турбулентності.
4. Розрахунок концентрацій і дальності поширення домішок  $PM_{2.5}$  від джерел викидів в приземному шарі атмосфери на основі рівняння переносу.

### 3.2.2 Визначення умов поширення домішок в атмосфері

Рух великої кількості дрібних частинок (вихорів) супроводжується турбулентною дифузією, тобто в процесі дрібномасштабного турбулентного перемішування спостерігається перенесення таких субстанцій, як водяна пара, тепло, домішки і, певною мірою, кількість руху з ділянок із надлишком цих властивостей до ділянок із нестачею тих самих властивостей. Дрібномасштабна дифузія прагне згладити контрасти в полях метеовеличин та домішок. Турбулентна дифузія відіграє важливу роль, оскільки вся водяна пара, більша частина тепла та різні домішки надходять до тропосфери від земної поверхні під впливом турбулентності. Будь-який турбулентний вихор може розпастися на дрібніші, і цей процес може продовжуватися доти, доки вихор не розпадеться на молекули повітря. Молекулу можна розглядати як найменший можливий вихор, а безладний рух молекул – як нижню межу турбулентного руху на дрібномасштабному кінці спектра. Взаємодія рухомих молекул породжує перенесення речовини (молекулярна дифузія), тоді як змішування невеликих вихорів, що рухаються, в шарах атмосферного повітря супроводжується перенесенням речовини (турбулентна дифузія).

Тривимірне рівняння поширення домішок у турбулентному середовищі можна записати наступним чином [293]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(M,t)}{\partial t} + \eta(t)n(M,t) + \left( \frac{\partial}{\partial t} (v_x(M,t)n(P,t)) + \frac{\partial}{\partial t} (v_y(M,t)n(P,t)) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial t} (v_z(M,t)n(P,t)) \right) - \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \tau_x(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tau_y(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial y} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left( \tau_z(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial z} \right) \right) = \omega(M,t), \end{aligned} \quad (3.9)$$

де  $n(M,t)$  – концентрація забруднюючої речовини в заданій точці  $M$  від джерела викидів у певний момент часу  $t$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\eta(t)$  – коефіцієнт, що характеризує ступінь видалення або привнесення домішок у заданий об'єм внаслідок хімічних або інших процесів, які відбуваються в приземному шарі атмосфери;

$v_x, v_y, v_z$  – векторні компоненти швидкості вітру, м/с;

$\tau$  – турбулентність, що характеризується коефіцієнтом турбулентної дифузії, м<sup>2</sup>/с, перенесення відбувається вздовж координатних осей  $Ox, Oy, Oz$ ;

$\omega$  – потужність джерела викидів забруднюючих речовин, кг/м<sup>3</sup>·с.

З використанням закону збереження маси рівняння (3.9) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial n(M,t)}{\partial t} + \eta(t)n(M,t) + \left( v_x \frac{\partial}{\partial t}(n(M,t)) + v_y \frac{\partial}{\partial t}(n(M,t)) + v_z \frac{\partial}{\partial t}(n(M,t)) \right) - \\ & - \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \tau_x(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tau_y(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial y} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left( \tau_z(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial z} \right) \right) = \omega(M,t). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Для подальшого вирішення поставленого завдання використаємо метод покоординатного розщеплення (рис. 3.5).

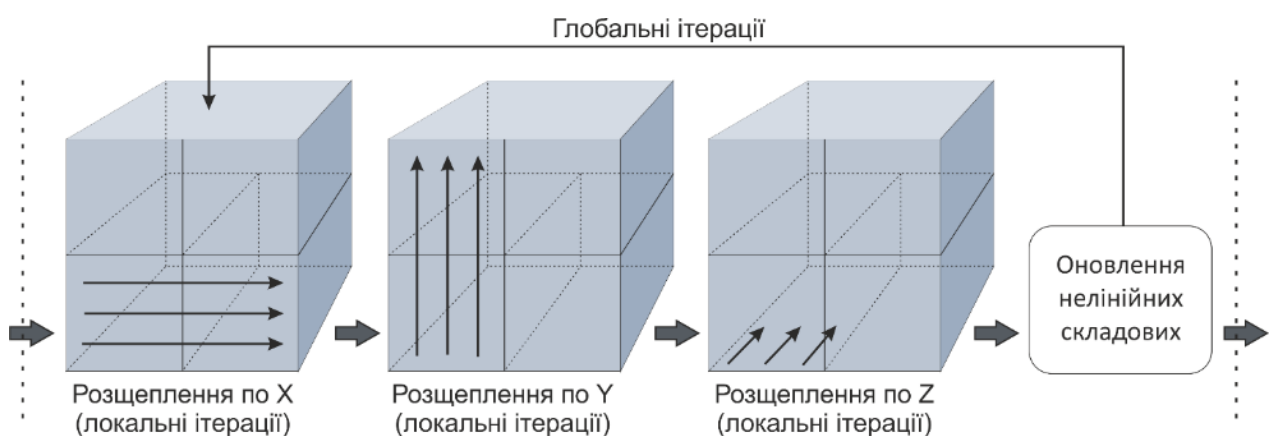


Рисунок 3.5 – Структура алгоритму для тривимірної задачі переносу у рамках рекурсивно-ітераційного підходу

Даний метод використовується для розв'язання параболічних або еліптичних рівнянь з частковими похідними. Він використовується для вирішення задач мінімізації функцій, які можуть бути представлені як сума функцій окремих змінних. Ідея методу полягає у розщепленні рівнянь на декілька більш простих – за рівнянням вздовж кожної координатної вісі. Ця процедура виконується таким чином, що похідні вздовж відповідного напрямку визначаються неявно, а решта координат вважаються постійними. Такий метод може бути ефективним для задач з великою кількістю змінних, коли кожне рішення може бути знайдено досить швидко.

Відповідно до теорії методу покоординатного розщеплення сформулюємо таке твердження: процес розв'язання задачі (1) може мати розв'язок за таких умов:

- 1)  $M = M(x, y, z)$  – точка досліджуваної зони простору  $n(x|t)$ , де  $M \in \Omega \subset R_3$ ,  $t \in [0, T]$ ;
- 2) при початкових умовах  $n(M, t)|_{t=0} = n(M, 0) = n_0(M)$ ;
- 3) при граничних умовах  $n(M, t) = \bar{n}(M, t)$ ,  $P \in \bar{\Omega}$ ,

де  $n_0(M)$ ,  $\bar{n}(M, t)$  – задані функції,  $\bar{\Omega}$  – межа зони простору  $\Omega$ ,  $n(M, t)$  – концентрація домішок у точці простору у певний момент часу  $t$ . При цьому поле турбулентності має вигляд діагональної матриці:

$$\tau(M, t) = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \tau_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{zz} \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

де  $\tau_{xx} = \tau_x(M, t)$ ,  $\tau_{yy} = \tau_y(M, t)$ ,  $\tau_{zz} = \tau_z(M, t)$ ,  $\tau(M, t)$  – тензор.

Рівняння (3.10), (3.11) є вихідними умовами побудови для розробки алгоритму і моделі поширення забруднюючих речовин в приземному шарі повітря.

### 3.2.3 Алгоритм моделі поширення забруднюючих речовин

Відповідно до методу покоординатного розщеплення кожна змінна залежно від напрямку кожної координатної вісі ( $x, y, z$ ) в (3.10) розглядається по черзі щоб оптимізувати функцію тільки за цією змінною, залишаючи решту змінних фіксованими. Розв'язок задачі (3.10) можна розбити на три частини ( $t_j \leq t \leq t_{j+1}$ ):

I частина

$$\begin{aligned}
 n_1 + \eta n_1 + \frac{\partial}{\partial z}(\nu_z n_1) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \tau_z \frac{\partial n_1}{\partial z} \right) &= \delta_1 \omega(M, t); \\
 M_1 &= M(z|x, y); M_4 = M(0|x, y); M_5 = M(z|x, y); \\
 n_1(M_1, t=0) &= n_0(M_1), t=0; n_1(M, t_j) = n_3(M, t_{j+1}), \text{ при } t > 0; \\
 n_1(M_4, t) &= \bar{n}_4(x, y, t); n_1(M_5, t) = \bar{n}_5(x, y, t).
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

II частина

$$\begin{aligned}
 n_2 + \frac{\partial}{\partial x}(\nu_x n_2) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \tau_x \frac{\partial n_2}{\partial x} \right) &= \delta_2 \omega(M, t); \\
 M_2 &= M(x|y, z); M_6 = M(0|y, z); M_7 = M(x|y, z); \\
 n_2(M, t_j) &= n_1(M, t_{j+1}); n_2(M_6, t) = \bar{n}_6(y, z, t); n_2(M_7, t) = \bar{n}_6(y, z, t).
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

III частина

$$\begin{aligned}
 n_3 + \frac{\partial}{\partial y}(\nu_y n_3) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \tau_y \frac{\partial n_3}{\partial y} \right) &= \delta_3 \omega(M, t); \\
 M_3 &= M(y|x, z); M_8 = M(0|x, z); M_9 = M(y|x, z); \\
 n_3(M, t_j) &= n_2(M, t_{j+1}); n_3(M_8, t) = \bar{n}_8(x, z, t); n_3(M_9, t) = \bar{n}_9(x, z, t); \\
 \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 &= 1.
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Для розв'язання рівняння (3.11) допустимо, що  $n(M, t) = n_3(M, t)$ . Далі виконаємо умову параметризації:

нормування параметрів:

$$\begin{aligned} \langle x \rangle &= \frac{x}{X}, \langle y \rangle = \frac{y}{Y}, \langle z \rangle = \frac{z}{Z}, \langle t \rangle = \frac{t}{T}, \\ \langle x \rangle &\in [0;1], \langle y \rangle \in [0;1], \langle z \rangle \in [0;1], \langle t \rangle \in [0;1], \end{aligned} \quad (3.15)$$

функцій:

$$\begin{aligned} v_i^{(0)}(t) &= \max v_i(P, t); \tau_i^{(0)}(t) = \max \tau_i(P, t); \omega_i^{(0)}(t) = \max \omega_i(P, t); \\ \langle v_i \rangle &= \frac{v_i}{v_i^{(0)}}; \langle \tau_i \rangle = \frac{\tau_i}{\tau_i^{(0)}}; \langle \omega_i \rangle = \frac{\omega_i}{\omega_i^{(0)}}; \\ \langle v_i \rangle &\in [0;1]; \langle \tau_i \rangle \in [0;1]; \langle \omega_i \rangle \in [0;1]; \\ \langle M \rangle &= M(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle), i = 1 \div 3. \end{aligned} \quad (3.16)$$

В рівняннях (3.16) прийнято відповідність  $v_1$  компоненті поля швидкості вітру  $v_z$  у напрямку вісі Oz, відповідність  $v_2$  компоненті поля швидкості вітру  $v_x$  у напрямку вісі Ox, відповідність  $v_3$  компоненті поля швидкості вітру  $v_y$  у напрямку вісі Oy.

Щодо коефіцієнтів турбулентності, то  $\tau_1$  відповідає  $\tau_z$ ,  $\tau_2 \rightarrow \tau_x$ ,  $\tau_3 \rightarrow \tau_y$ .

Виконаємо нормування початкових і граничних умов:

$$\begin{aligned} n(M, t=0) &= n_0(M); n^{(0)} = \max n_0(M); \\ \langle n \rangle &= \frac{n}{n^{(0)}}; \overline{n_k}(\langle M_k \rangle, \langle t \rangle) = \frac{\overline{n_k}(M_k, t)}{n^{(0)}}, k = 4 \div 9; \\ n_3(M, t_j) &= n_2(M, t_{j+1}); n_3(M_8, t) = \overline{n_8}(x, z, t); n_3(M_9, t) = \overline{n_9}(x, z, t); \\ \langle n_0(\langle M \rangle) \rangle &\in [0;1]; \langle n(\langle M \rangle, \langle t \rangle) \rangle \in [0;1]; \langle n_k(\langle M \rangle, \langle t \rangle) \rangle \in [0;1]; \\ \langle M_4 \rangle &= M(0|\langle x \rangle, \langle y \rangle); \langle M_5 \rangle = M(1|\langle x \rangle, \langle y \rangle); \langle M_6 \rangle = M(0|\langle y \rangle, \langle z \rangle); \\ \langle M_7 \rangle &= M(1|\langle y \rangle, \langle z \rangle); \langle M_8 \rangle = M(0|\langle y \rangle, \langle z \rangle); \langle M_9 \rangle = M(1|\langle x \rangle, \langle z \rangle). \end{aligned} \quad (3.17)$$



Проведемо нормування коефіцієнтів параметризованої системи:

$$\begin{aligned}
 \langle \eta \rangle(\langle t \rangle) &= \eta(\langle t \rangle)T; \\
 \sigma_z(\langle t \rangle) &= \frac{\nu_z^{(0)}(t)T}{Z}; \varepsilon_z(\langle t \rangle) = \frac{\tau_z^{(0)}(t)T}{Z^2}; \zeta_1(\langle t \rangle) = \frac{\omega^{(0)}(t)T}{n^{(0)}}; \\
 \sigma_x(\langle t \rangle) &= \frac{\nu_x^{(0)}(t)T}{X}; \varepsilon_x(\langle t \rangle) = \frac{\tau_x^{(0)}(t)T}{X^2}; \zeta_2(\langle t \rangle) = \zeta_1(\langle t \rangle); \\
 \sigma_y(\langle t \rangle) &= \frac{\nu_y^{(0)}(t)T}{Y}; \varepsilon_y(\langle t \rangle) = \frac{\tau_y^{(0)}(t)T}{Y^2}; \zeta_3(\langle t \rangle) = \zeta_2(\langle t \rangle); \\
 \omega_i(M, t) &= \lambda_i \omega(M, t).
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Після виконаних процедур складові частини (3.12)-(3.14) рівняння (3.10) мають вигляд:

I частина

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \langle n_1 \rangle}{\partial \langle t \rangle} + \langle \eta \rangle \langle n_1 \rangle + \sigma_z \nu_z \frac{\partial \langle n_1 \rangle}{\partial \langle z \rangle} - \varepsilon_z \frac{\partial}{\partial \langle z \rangle} \left( \langle \tau_z \rangle \frac{\partial \langle n_1 \rangle}{\partial \langle z \rangle} \right) &= \zeta \langle \omega_1 \rangle(\langle M_1 \rangle, \langle t \rangle); \\
 \langle n_1 \rangle(\langle M_1 \rangle, 0) &= \langle n_0 \rangle(\langle M_1 \rangle) \text{ при } \langle t \rangle = 0; \\
 \langle n_1 \rangle(\langle M \rangle, \langle t_j \rangle) &= \langle n_3 \rangle(\langle M_1 \rangle, \langle t_{j+1} \rangle) \text{ при } \langle t \rangle > 0; \\
 \langle n_1 \rangle(\langle M_4 \rangle, \langle t \rangle) &= \langle \bar{n}_4 \rangle(\langle M_4 \rangle, \langle t \rangle); \langle n_1 \rangle(\langle M_5 \rangle, \langle t \rangle) = \langle \bar{n}_5 \rangle(\langle M_5 \rangle, \langle t \rangle).
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

II частина

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \langle n_2 \rangle}{\partial \langle t \rangle} + \sigma_x \nu_x \frac{\partial \langle n_2 \rangle}{\partial \langle x \rangle} - \varepsilon_x \frac{\partial}{\partial \langle x \rangle} \left( \langle \tau_x \rangle \frac{\partial \langle n_2 \rangle}{\partial \langle x \rangle} \right) &= \zeta_2 \langle \omega_2 \rangle(\langle M_2 \rangle, \langle t \rangle); \\
 \langle n_2 \rangle(\langle M \rangle, \langle t_j \rangle) &= \langle n_1 \rangle(\langle M \rangle, \langle t_{j+1} \rangle); \\
 \langle n_2 \rangle(\langle M_6 \rangle, \langle t \rangle) &= \langle \bar{n}_6 \rangle(\langle M_6 \rangle, \langle t \rangle); \\
 \langle n_2 \rangle(\langle M_7 \rangle, \langle t \rangle) &= \langle \bar{n}_7 \rangle(\langle M_7 \rangle, \langle t \rangle).
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

## III частина

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \langle n_3 \rangle}{\partial \langle t \rangle} + \sigma_y \nu_y \frac{\partial \langle n_3 \rangle}{\partial \langle y \rangle} - \varepsilon_y \frac{\partial}{\partial \langle y \rangle} \left( \langle \tau_y \rangle \frac{\partial \langle n_3 \rangle}{\partial \langle y \rangle} \right) &= \zeta_3 \langle \omega_3 \rangle (\langle M_3 \rangle, \langle t \rangle); \\
\langle n_3 \rangle (\langle M \rangle, \langle t_j \rangle) &= \langle n_2 \rangle (\langle M \rangle, \langle t_{j+1} \rangle); \\
\langle n_3 \rangle (\langle M_8 \rangle, \langle t \rangle) &= \langle \bar{n}_8 \rangle (\langle M_8 \rangle, \langle t \rangle); \\
\langle n_3 \rangle (\langle M_9 \rangle, \langle t \rangle) &= \langle n_9 \rangle (\langle M_9 \rangle, \langle t \rangle).
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Для обчислення інтегралів, які входять в основні розрахункові формули ітераційно-рекурсивного обчислювального методу, потрібні значення підінтегральних функцій, що відповідають вихідному розподілу. Це в свою чергу зумовлює включення в загальну схему алгоритмів процедур апроксимації на заданому інтервалі вихідних функцій. В узагальненому вигляді алгоритм отримує вигляд для рівняння (3.10):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \langle n \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle t \rangle} + \langle n \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle) \cdot \left( \eta + \sigma \frac{\partial \langle \nu \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle x \rangle} \right) + \\
+ \frac{\partial \langle n \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle x \rangle} \cdot \left( \sigma \langle \nu \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle) - \varepsilon \frac{\partial \langle \tau \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle x \rangle} \right) - \\
- \frac{\partial^2 \langle n \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle x \rangle^2} \cdot (\varepsilon \langle \nu \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle)) = \zeta \langle \omega \rangle (\langle x \rangle, \langle t \rangle).
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Виконаємо нормування початкових і граничних умов, нормованих параметрів із  $[0; 1]$  і спростимо рівняння (3.22)

$$\dot{n}(\langle x \rangle, \langle t \rangle) + B(\langle x \rangle, \langle t \rangle)n(\langle x \rangle, \langle t \rangle) + C(\langle x \rangle, \langle t \rangle) = 0. \tag{3.23}$$

Рівняння (3.23) розв'язуємо як однорідне диференціальне першого порядку відносно параметру  $t$ , при  $x = \text{const}$ . Тоді

$$n(x,t) = e^{-\int_{t_0}^t \left( \eta(t') + \sigma(t') \frac{\partial v(x,t')}{\partial x} \right) dt'} \left( n(x,t_0) - \int_{t_0}^t \left( f(x,t') - \zeta \omega(x,t') e^{\int_{t_0}^{t'} \left( \eta(t'') + \sigma(t'') \frac{\partial v(x,t'')}{\partial x} \right) dt''} \right) dt' \right), \quad (3.24)$$

що у свою чергу призводить до функції

$$n(x,t) = k(x,t) - \int_{t_0}^t \bar{\omega}(x,t,t') f(x,t') dt'. \quad (3.25)$$

Таким чином, рівняння (3.25) є функцією розподілу домішок в приземному шарі атмосфери на основі рівняння (3.9) поширення домішок у турбулентному середовищі.

### 3.2.4 Програмна реалізація моделі поширення домішок в приземному шарі атмосфери

Знаходження функції (3.25) зводиться до чисельного моделювання. Введення функції  $n(x|t)$ , де  $x \in [0; 1]$  відіграє роль параметра. Тоді для кожного фіксованого значення  $x$  інтегральне рівняння відносно  $n(x|t)$  є інтегральним рівнянням Вольтера другого порядку, чисельний розв'язок якого здійснюється методом поступових наближень.

Оскільки за даними дослідження можна з достатнім ступенем точності врахувати вхідні і вихідні змінні, то раціонально було побудувати рівняння регресії. На його основі було реалізовано повний центральний ортогональний композиційний план другого порядку. Для подальшої можливості порівняння значень концентрації, швидкості і температури нормували вхідні змінні за формулами вибіркового середнього значення.

Вихідними даними для моделювання були наступні параметри:

1) величину швидкості вітру в моделі приймалася в діапазоні від 5 до 10 м/с, що є небезпечною швидкістю вітру (досягаються найвищі концентрації забруднюючих речовин в приземному шарі);

2) температури повітря в розрахунках приймалась на основі середніх значень теплого (+20 °С) і холодного (0 °С) періоду року;

3) турбулентність атмосферного повітря в діапазоні 10–155 м<sup>2</sup>/с, що відповідає змінам протягом року;

3) висота джерела забруднення становить 65 м, діаметр труби – 1,2 м, температура викиду 70 °С, концентрація забруднювача –  $0,25 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>3</sup>. Дисперсний склад розрахункових часток забруднювача – 0,3 мкм, густина частинок –  $3 \cdot 10^3$  мг/см<sup>3</sup>.

Розмір розрахункової ділянки прийнято 10 · 10 км.

Для оцінки точності отриманої моделі обчислювалися суми квадратів відхилень експериментальних значень вихідних змінних від розрахункових.

Адекватність моделі перевірялась за критерієм Фішера, а оцінка значимості коефіцієнтів моделі проводилася на основі розподілу Стьюдента. Далі, впевнившись у адекватності нормованих даних, було чисельно змодельовано за допомогою ітераційно-рекурсивного методу процес розсіювання концентрації викидів поблизу джерела.

Нижче наведено візуальні результати чисельного моделювання у вигляді тривимірних і двовимірних візуалізацій в математичному середовищі РТС Mathcad Prime 7 (рис. 3.6–3.11).

У різні пори року метеорологічні показники (температура, вітер, перенесення повітряних мас) системи рівнянь поширення речовин у турбулентній атмосфері різні, тому результати моделювання, що наведені на рис. 3.6–3.11, відповідають різним умовам в залежності від пори року.

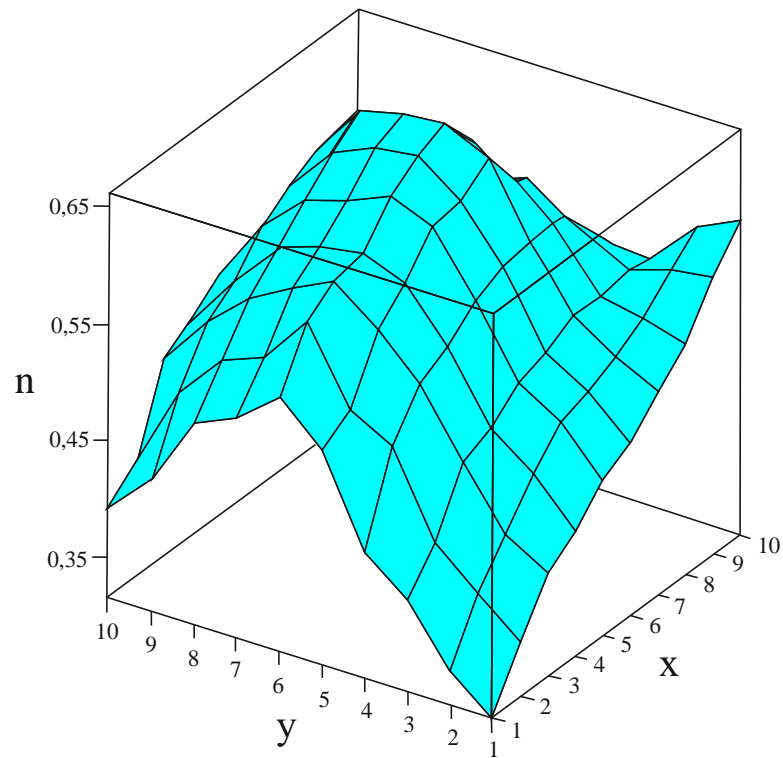


Рисунок 3.6 – Розподіл концентрації  $n(M, t)$  при  $v=5$  м/с,  $\tau_{1,0}=155$  м<sup>2</sup>/с,  
 $\tau_{2,0}=55$  м<sup>2</sup>/с,  $\tau_{3,0}=15$  м<sup>2</sup>/с

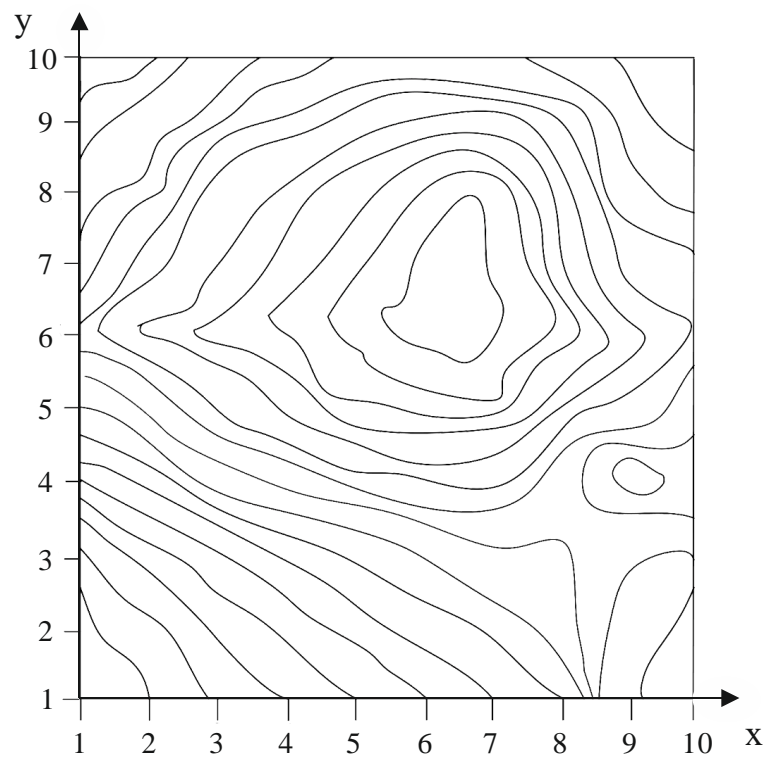


Рисунок 3.7 – Лінії концентрацій при  $n=0,5$  кг/м<sup>3</sup>,  $\tau_{1,0}=155$  м<sup>2</sup>/с,  $\tau_{2,0}=55$   
 м<sup>2</sup>/с,  $\tau_{3,0}=15$  м<sup>2</sup>/с

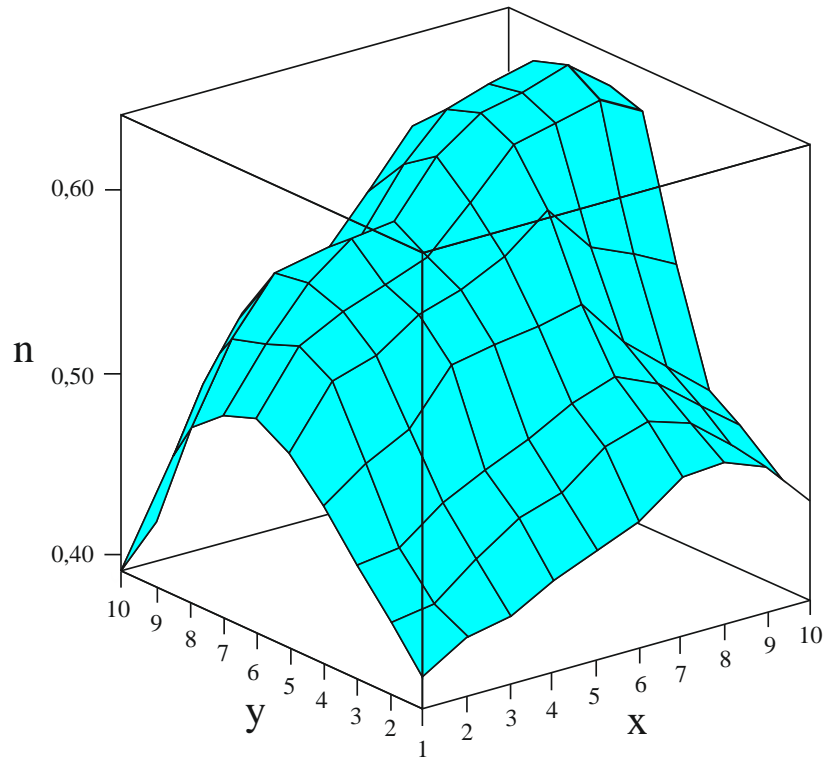


Рисунок 3.8 – Розподіл концентрації  $n(M, t)$  при  $v=10$  м/с,  $\tau_{1,0}=100$  м<sup>2</sup>/с,  
 $\tau_{2,0}=100$  м<sup>2</sup>/с,  $\tau_{3,0}=10$  м<sup>2</sup>/с

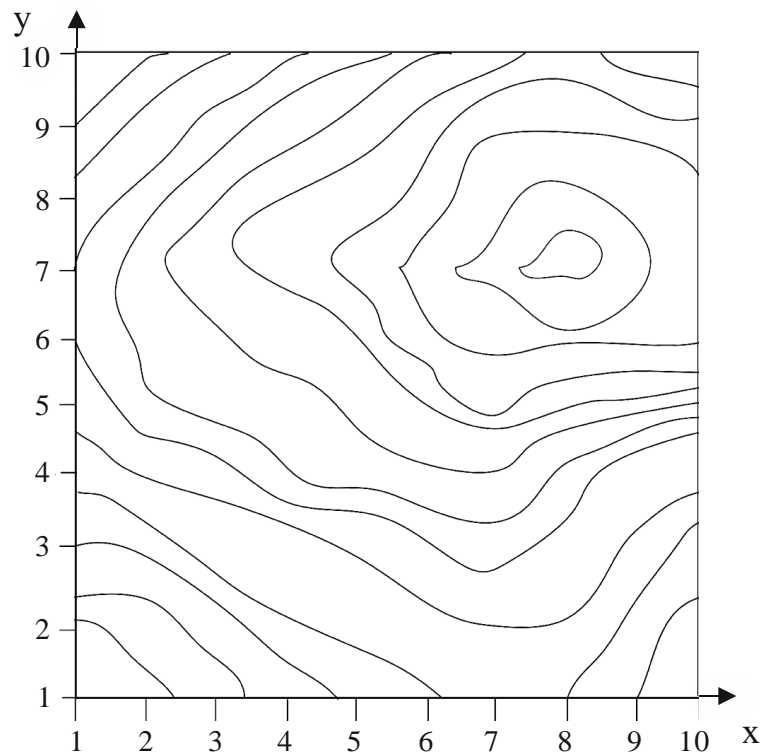


Рисунок 3.9 – Лінії концентрацій при  $n=0,5$  кг/м<sup>3</sup>,  $\tau_{1,0}=100$  м<sup>2</sup>/с,  
 $\tau_{2,0}=100$  м<sup>2</sup>/с,  $\tau_{3,0}=10$  м<sup>2</sup>/с

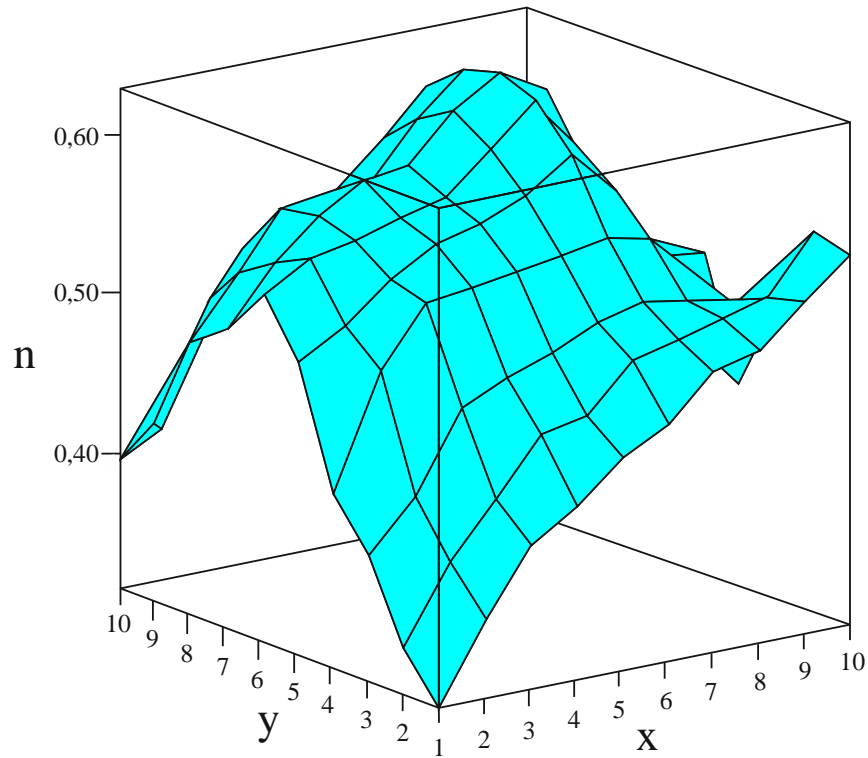


Рисунок 3.10 – Розподіл концентрації  $n(M, t)$  при  $v=7,5$  м/с,  $\tau_{1,0}=65$  м<sup>2</sup>/с,  
 $\tau_{2,0}=65$  м<sup>2</sup>/с,  $\tau_{3,0}=10$  м<sup>2</sup>/с

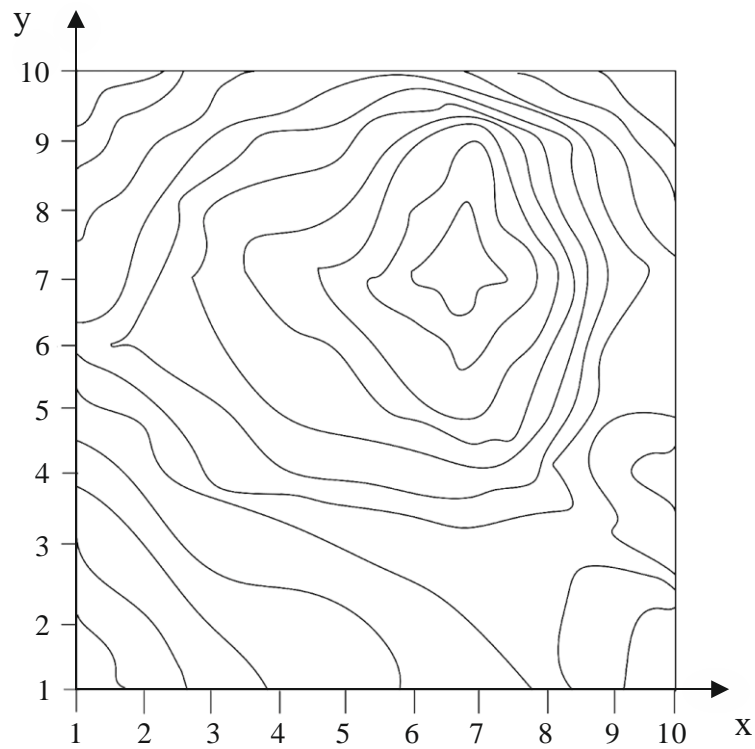


Рисунок 3.11 – Лінії концентрацій при  $n=0,5$  кг/м<sup>3</sup>,  $\tau_{1,0}=65$  м<sup>2</sup>/с,  $\tau_{2,0}=65$   
м<sup>2</sup>/с,  $\tau_{3,0}=10$  м<sup>2</sup>/с

Для кожного джерела викидів і характеристик забруднюючих речовин значення небезпечної швидкості вітру різне. Чим більший обсяг пилогазових викидів виходить з джерела викиду, тим більша сила вітру потрібна для притиснення димового шлейфа, що може сприяти поширенню забруднюючих речовин на великі відстані від джерела викиду, а також збільшувати концентрацію забруднюючих речовин в повітрі.

Небезпечна швидкість вітру може впливати на поширення забруднюючих речовин в атмосфері в два способи:

1. При високій швидкості вітру забруднюючі речовини можуть поширюватись на великі відстані від джерела викиду. Якщо забруднюючі речовини мають токсичні властивості, це може призвести до забруднення повітря на значній відстані від джерела викиду.

2. За високих швидкостей вітру забруднюючі речовини можуть змішуватись з повітрям на великій висоті і переноситись до нижніх шарів атмосфери та підвищити їх концентрацію в приземному шарі, збільшуючи ризик для здоров'я населення.

Поступове збільшення швидкості вітру понад небезпечну (5 і більше м/с) у поєднанні зі зміною турбулентності (нестійкою стратифікацією) повітря і постійними умовами параметрів джерел викидів забруднюючих речовин дозволяють отримати наступні результати:

- при швидкості вітру 5 м/с (найменше значення небезпечної швидкості вітру відповідно до умов задачі) і значеннях турбулентності приземного шару повітря 15–155 м<sup>2</sup>/с (рис. 3.6, 3.7) концентрація домішок  $n$  (поверхня графіка) на відстані 5 км змінюється в діапазоні 0,3–0,57 концентрації від джерела викиду.

- при швидкості вітру 10 м/с (найвище значення небезпечної швидкості вітру відповідно до умов задачі) і значеннях турбулентності приземного шару повітря 10–100 м<sup>2</sup>/с (рис. 3.8, 3.9) концентрація домішок  $n$  на відстані 5 км змінюється в діапазоні 0,4–0,57 концентрації від джерела викиду. Таке поєднання метеорологічних умов дає найбільш шкідливий для навколишнього



середовища результат від розсіювання дрібнодисперсної забруднюючої речовини.

– при швидкості вітру 7,5 м/с (середнє значення небезпечної швидкості вітру відповідно до умов задачі) і значеннях турбулентності приземного шару повітря 10–65 м<sup>2</sup>/с (рис. 3.10, 3.11) концентрація домішок  $n$  на відстані 5 км змінюється в діапазоні 0,3–0,54 концентрації від джерела викиду.

Поверхневі коливання викликані турбулентною дифузією та швидкістю вітру. Рисунки 3.6–3.11 дозволяють говорити про значну відстань розсіювання дрібних частинок від джерела викидів з урахуванням різних вихідних параметрів джерел викиду та умов розподілу домішок в атмосфері.

Програмний алгоритм розрахунку моделі розподілу дрібнодисперсних забруднюючих речовин вимагає сучасного комп'ютерного програмного забезпечення, доступного більшості користувачів. Розрахунок займає 30 – 40 хвилин для кожної нової початкової умови, що є перевагою запропонованої моделі. Модель має широкий діапазон вхідних даних для швидкості вітру та атмосферної турбулентності, в межах яких результати є адекватними.

### **3.2.5 Перевірка адекватності програмних результатів розрахунку моделі**

Адекватність результатів математичної моделі перевіряли на реальному об'єкті хімічної промисловості – ПАТ «СУМИХІМПРОМ» (координати 50.88632, 34.87668) на межі СЗЗ та за територією підприємства, яке має подібні початкові умови математичної моделі, дрібнодисперсний пил  $TiO_2$  має розмір 0,3 мкм.

Місця відбору проб позначено на суміщеній фізичній карті (рис. 3.9) території навколо ПАТ «Сумихімпром» та розрахункової карти згідно спеціалізованої програми «ЕОЛ 2000» (методика ОНД-86).

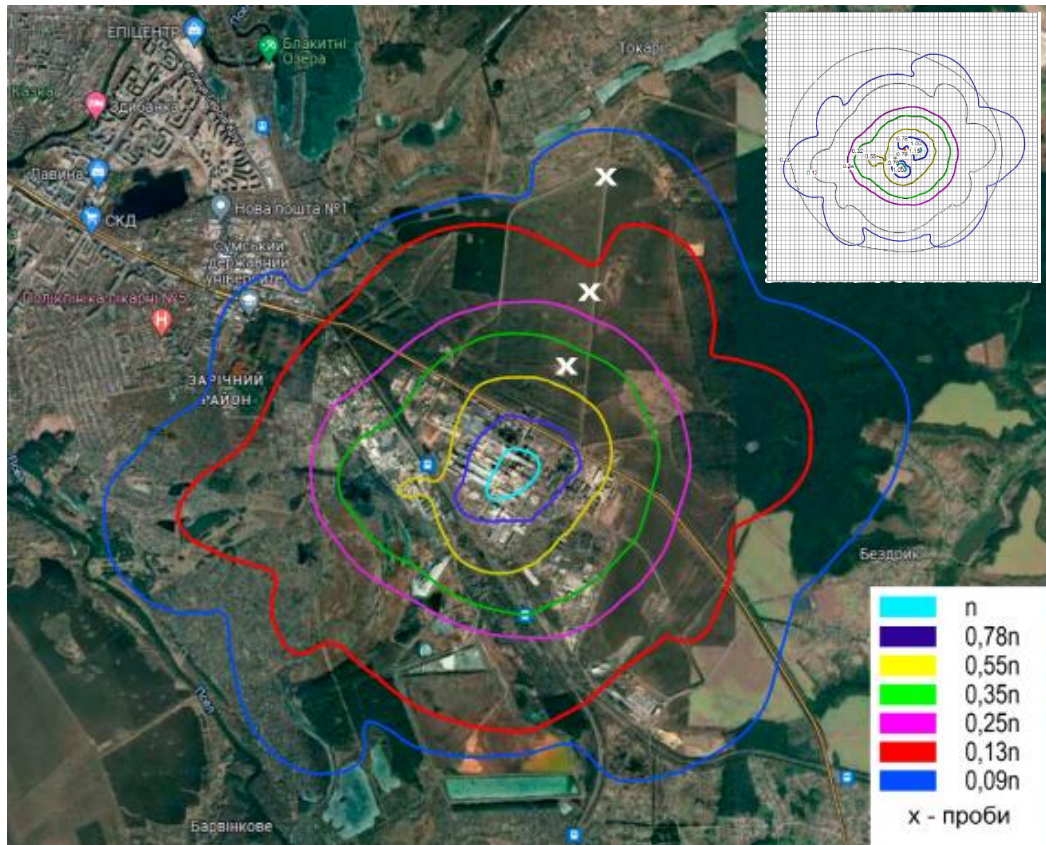


Рисунок 3.12 – Розміщення джерела забруднення з початковою концентрацією викиду забруднюючих речовин  $n$  і точками відбору проб  $x$

Місця відбору проб позначені «X» і отримані результати вимірів запиленості повітря за напрямом вітру наведені в табл. 3.2 (при початковій концентрації на виході з джерела викидів  $n = 1 \text{ г/м}^3$ ). Попередні заміри вмісту у приземному шарі повітря часток двоокису титану, які були проведені у 2018 і 2019 роках вказують на стабільне надходження цих речовин у навколишнє середовище і те, що за цей період часу не відбувалось суттєвих змін у процесі очищення викидів. Так, залежно від обсягів та характеру викидів, а також від швидкості вітру, забруднюючі речовини можуть досить швидко розповсюджуватись та впливати на прилеглі території. У разі залпових викидів чи неполадок в очисному обладнанні, концентрації забруднюючих речовин можуть бути значно вищими за норму та негативно впливати на здоров'я людей та навколишнє середовище. Так, на території прилеглої до Сумського державного університету на листяних деревах протягом

вегетаційного періоду постійно спостерігається наявність шару пилу, хоча вона розташована за межею СЗЗ.

Таблиця 3.2 – Стан запиленості повітряного середовища на територіях, прилеглих до ПАТ «Сумихімпром» (станом на 18.06.2020)

Місце відбору проб	Концентрація, *100 % n		
	макс.	мінім.	середня
1 500 м від джерела	0,5	0,34	0,42
2 500 м від джерела	0,26	0,18	0,22
4 000 м від джерела	0,12	0,1	0,11

Натурні вимірювання дозволили встановити вміст пилу  $TiO_2$  у повітрі на відстані 4000 м (за умов вітру 5 м/с) від джерела викиду на рівні 10 – 12 % від початкової концентрації викидів.

Для порівняння математичної моделі з розрахунками за ОНД-86 та експериментальними даними, проведемо розрахунок для одинарного точкового джерела в одному напрямку і побудуємо порівняльний графік (рис. 3.13).

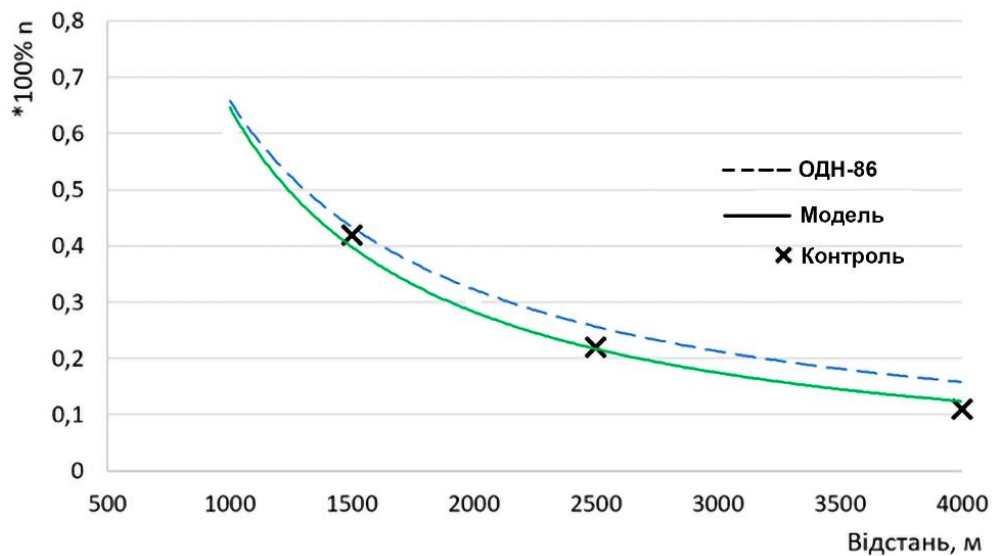


Рисунок 3.13 – Порівняльний аналіз результатів розрахунку розсіювання дрібнодисперсного пилу по математичній моделі, методиці ОНД-86 та контрольного відбору проб

Аналіз отриманого графіку (рис. 3.13) говорить про те, що математична модель має високу достовірність та може бути використана для прогнозування концентрацій забруднюючих речовин на відстані від джерела викиду. Врахування факторів, які впливають на процес перенесення забруднюючих речовин, дозволило отримати більш точні результати порівняно з методикою ОНД-86, яка не враховує всі аспекти процесу перенесення забруднюючих речовин в атмосфері. Суцільна лінія є степеневою залежністю результатів розрахунку розсіювання математичної моделі (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,9816$ ), пунктирна – результат розрахунку за методикою ОНД-86 ( $R^2 = 0,946$ ).

Для перевірки адекватності математичної моделі та методики ОНД-86 експериментальним значенням концентрацій проведемо кореляцію значень величин згідно графіків на рис. 3.13. Так, кореляція значень розрахунків згідно методики ОНД-86 і експериментальних значень складає збіжність розрахунків на рівні 96%. Кореляція даних математичної моделі і експериментальних значень встановлює збіжність результатів на рівні 97%, що говорить в даному випадку про більшу адекватність математичної моделі в порівнянні з методикою ОНД-86.

Для перевірки дисперсного складу та елементного вмісту пилу було відібрано проби пилу на межі СЗЗ підприємства, враховуючи переважний напрямок вітру (південний вітер), за допомогою електроаспіратора-822 на поверхню фільтру АФА-ВП-10. Проведені мікроскопічні дослідження пилу на базі Інституту прикладної фізики (ІПФ, м. Суми), дозволяють стверджувати те, що він є дрібнодисперсним (рис. 3.14).

Результати растрової електронної мікроскопії з рентгенівським мікроаналізом (на базі ІПФ) відібраних проб пилу, реалізовані на приладі РЕММА-102 (SELMI) з використанням енергодисперсійного спектрометра EDX (ЕДАР), підтверджують втрати як титановмісної сировини так і готового продукту.



Рисунок 3.14 – Загальний вигляд пилу (збільшення X6000)

Так, згідно з комп'ютерним розрахунком аналітичного сигналу та отриманих рентгенівських спектрів поглинання вміст елементного титану у відібраному зразку пилу становить близько 50% (масовий). Вміст супутніх речовин у зразках відібраних проб, зумовлений сторонніми чинниками і для елементного кремнію не перевищує 15%, а вміст кальцію не більше 5%.

Згідно ключових позицій цілей сталого розвитку та забезпечення належного рівня екологічної безпеки будь-якого промислового виробництва не достатньо, щоб концентрація шкідливих речовин не перевищувала допустимих значень на межі санітарно-захисної зони підприємства, вона повинна бути якомога меншою. За для цього повинні впроваджуватися новітні методики поводження з викидами і використовуватися високоефективні конструкції пилогазоочисного обладнання, одним з яких є застосування апаратів з РПН.

### **3.2.6 Практична реалізація моделі розсіювання забруднюючих речовин з використанням Web-платформи**

Забруднення повітря може мати серйозний вплив на здоров'я людей, тому, інформування громадськості про рівень забруднення повітря допоможе людям приймати обґрунтовані рішення щодо захисту свого здоров'я.

В останні роки Web-додатки стрімко розвиваються, поступово витісняючи настільні рішення і стаючи найважливішою складовою програмного розвитку сучасного світу. Тому, для подальшого розвитку було обрано реалізацію Web-додатку, який візуалізує зміну дальності поширення забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери за вихідними даними і алгоритмом розробленої математичної моделі (Додаток В).

Користувальницька (або клієнтська) частина побудована на HTML-розмітці, CSS-стилях і JavaScript [372, 373]. HTML необхідний для відображення вмісту сайту: текстів, заголовків, зображень, таблиць, текстових блоків, нумерованих і неупорядкованих списків нашого додатка. CSS – це стиль для контенту: колір і розмір шрифту, розташування елементів, відображення меж об'єктів, розміри блоків. У нашій програмі JavaScript реалізує динамічну взаємодію з користувачем: перевірку введених даних, відображення діалогових вікон, додавання та приховування елементів HTML [374]. Серверна частина забезпечує генерацію HTML-коду, збереження даних користувача, взаємодію зі сторонніми веб-сервісами. Клієнтська сторона – це графічний інтерфейс, який користувач бачить на у себе на сторінці. Користувач взаємодіє з веб-додатком через браузер, створюючи запити (клацання по посиланнях тощо), які обробляються зовнішнім користувачем. Результат виконання програми або сценарію залежить від використовуваного браузера та може виконуватися по-різному в різних його версіях. Браузер відразу відображає результат у вигляді звичайної веб-сторінки.

Моделювання дальності поширення забруднюючих речовин (зміна форми «хмари») і розуміння поширення зони впливу від джерела викидів на довкілля реалізовано відповідно до алгоритму в програмному середовищі Mathcad Prime 7 і поділяється на наступні основні кроки: Перевірка вхідних даних, Введення даних швидкості вітру, Розрахунок моделі, Створення хмари та Показ результату. Обробка текстурних об'єктів передбачає наступне: аналіз об'єктів і вибір відповідних текстур, матеріалів або їх створення, а потім їх розміщення в сцені для кожного об'єкта.

Після проведення розрахунку згідно алгоритму (Додаток В) потрібно підготувати деякі дані, які необхідно візуалізувати у Web-додатку. У загальному вигляді блок-схема програми наведена на рис. 3.15.

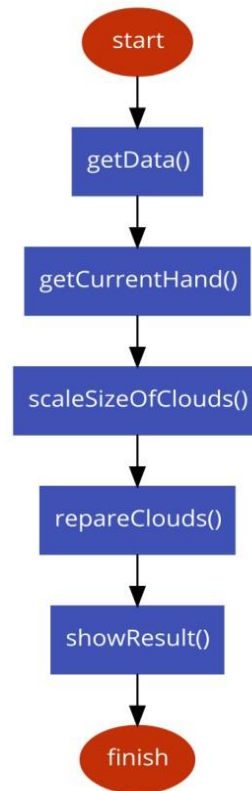


Рисунок 3.15 – Блок-схема програми Web-додатку

Після реалізації програмного розрахунку моделі найважливішим питанням є вибір кількості частинок, які одночасно присутні на сцені у вікні браузера, і спосіб їх рендерингу. Для бажаного візуального ефекту моделювання хмари використовуємо мале коло елементів (рис. 3.16).

Така архітектура програми дозволяє швидко створювати гнучкий Web-додаток. Для початку роботи з програмою необхідно перейти на початкову сторінку програми в браузері і ввести дані у відповідні поля. Дані будуть перевірені спеціальною функцією, яка показує результат для користувача. Наступне, що потрібно зробити – це вибрати швидкість вітру. У якості пріоритетного напрямку вітру прийнята кругова роза вітрів з рівномірною повторюваністю 12,5% за кожним із 8-ми напрямів вітру.

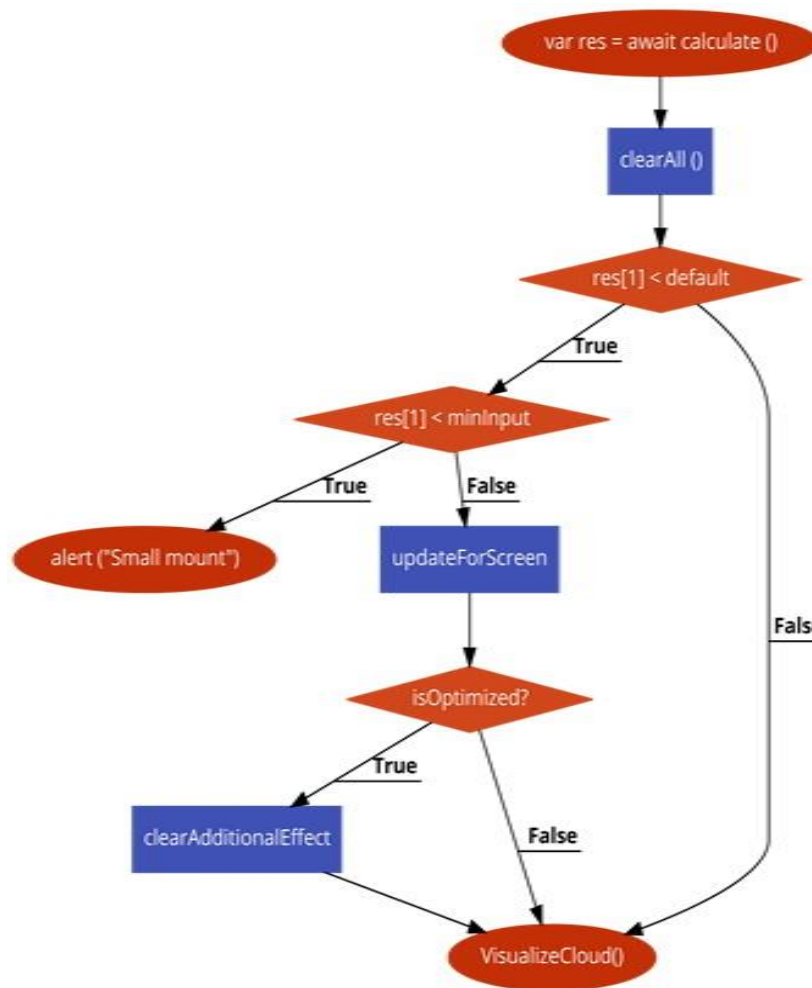


Рисунок 3.16 – Блок-схема візуалізації хмари викиду

Величина  $F$  в інтерфейсі програми відповідає за розмір і агрегатний стан частинок забруднюючої речовини: 1 – для пилогазових викидів, які містять зважені речовини розміром менше 2,5 мкм; 2 – для пилогазових викидів, які містять зважені речовини 2,5 – 10 мкм.

Після введення необхідних даних у вікні браузера потрібно натиснути кнопку «Обчислити», щоб побачити результати розрахунку дальності поширення забруднюючої речовини та візуалізовану хмару (рис. 3.17).

Розроблений Web-додаток оцінки дальності поширення забруднюючих речовин від джерела їх викидів є основою для розрахунку техногенного впливу промислових підприємств на навколишнє природне середовище, який може бути доступний широкому колу користувачів.



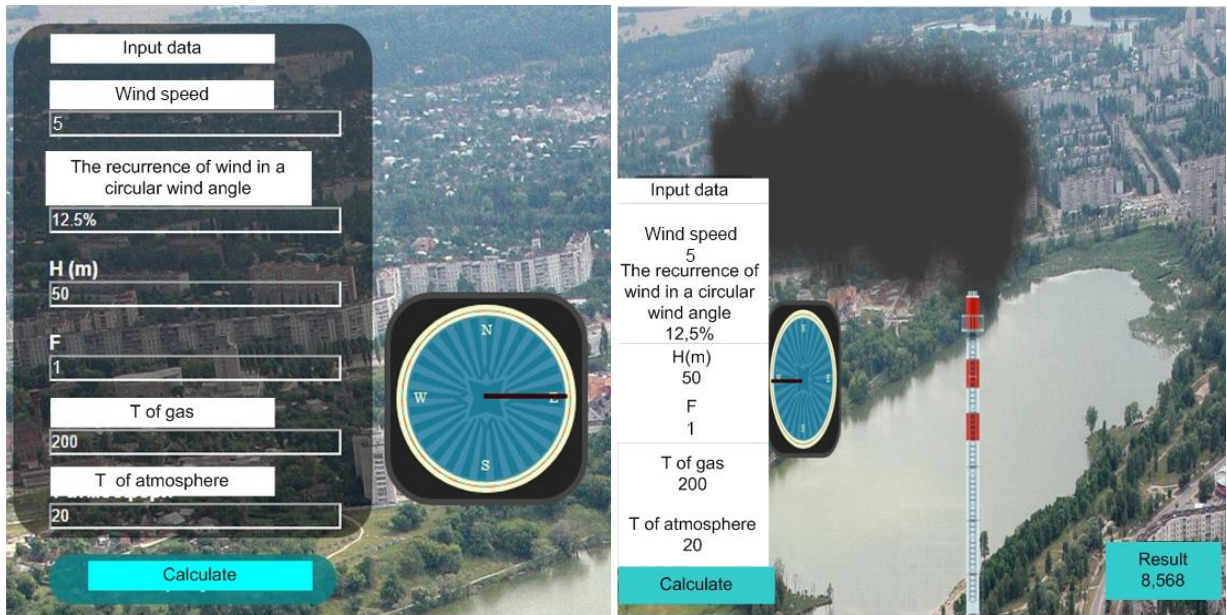


Рисунок 3.17 – Інтерфейс Web-додатку

Web-додаток може допомогти людям розуміти причини забруднення повітря і вказати на те, як вони можуть зробити внесок у зменшення його забруднення. Інформація про забруднення повітря, а також поради щодо того, як зменшити його рівень, можуть бути корисними для підвищення екологічної свідомості серед громадськості. Web-додаток є важливим інструментом для вимірювання та відстеження рівня забруднення повітря. Дані, зібрані за допомогою додатку, можуть допомогти науковцям, екологам та органам державного управління у питання розуміння та зменшення рівня забруднення повітря.

### 3.3 Висновки та узагальнення до розділу 3

У розділі 3 «Моделювання розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин в приземному шарі атмосфери» одержано такі результати.

1. Визначено основні переваги та недоліки існуючих математичних моделей з чисельним алгоритмом та програмним забезпеченням для прогнозування поширення забруднюючих речовин в атмосфері. Встановлено

необхідні вихідні параметри для побудови надійних моделей: температура повітря, швидкість і напрямок вітру, турбулентність повітря, параметри викидів забруднюючих речовин і джерел їх викидів.

2. В результаті моделювання отримано спрощене аналітичне рішення та побудовано алгоритм численного моделювання поширення дрібнодисперсних забруднювачів у повітряному шарі. Алгоритм чисельного моделювання розроблено методом координатного розщеплення рівняння розподілу домішок у турбулентному середовищі з подальшою нормуванням та параметризацією умов. Знаходження підінтегральних функцій в алгоритмі розрахунку дозволяє отримати стабільний розрахунковий алгоритм запропонованої моделі для розподілу дрібних зважених частинок.

Отримано інтегральне рівняння для розподілу забруднюючих речовин, яке може знайти практичне застосування при прогнозуванні та моделюванні дифузії домішок з джерел викидів.

3. Побудовано математичну модель поширення дрібнодисперсних зважених речовин в програмному середовищі РТС Mathcad Prime 7. Аналіз візуалізацій програмного розрахунку дозволив встановити, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається на відстані 4 км від джерела забруднення. Отримано розподіл концентрацій домішок для різних значень турбулентності атмосферного повітря (10–155 м<sup>2</sup>/с) та небезпечної швидкості вітру (5–10 м/с). Перевірка адекватності математичної моделі на основі графічних візуалізації розрахунків вказує на ефективність прийнятої моделі згідно чинного законодавства з урахуванням різних вихідних параметрів джерел викидів та умов розподілу домішок.

Отримана модель має широкий діапазон вхідних даних для швидкості вітру та атмосферної турбулентності. Результати моделювання є адекватними і можуть бути використані для швидкого вирішення екологічних проблем.

4. Розроблено Web-додаток для оцінки дальності поширення забруднюючих речовин від джерела їх викидів з використанням HTML-розмітки, CSS-стилів і мови програмування JavaScript. Web-додаток є

спрощеною програмою для обробки алгоритму математичної моделі розсіювання забруднюючих речовин і може використовуватися для оцінки техногенного впливу промислових підприємств на навколишнє природне середовище. Web–додаток запроваджено до використання в навчальному процесі (Додаток Є), також є можливість його використання в системах моніторингу для інформування та контролю викидів промислових підприємств на різних рівнях.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [289, 291, 292, 293].

## РОЗДІЛ 4

### СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПИЛОГАЗООЧИЩНОГО ОБЛАДНАННЯ

#### **4.1 Створення баз даних вихідних умов для вибору природозахисного обладнання**

Для реалізації виконання Директиви 2010/75/ЄС Україна повинна запроваджувати використання найкращих доступних технологій та методів управління зменшенням техногенного навантаження пилових викидів на довкілля.

Зменшення техногенного навантаження від пилогазових викидів і підвищення ефективності використання технологічних рішень на промислових підприємствах з метою збереження навколишнього середовища є актуальною проблемою для забезпечення життєдіяльності людства світового масштабу. Встановлено, що вдалий вибір природозахисного обладнання не може вирішити усі проблеми із забезпечення ефективного його використання, необхідно також оптимізувати технологічні схеми з урахуванням більшої кількості вихідних умов.

Традиційно на більшості промислових підприємств енергетичної та хімічної галузі схеми пилогазоочищення представлені апаратами сухого та мокрого типами очищення.

Як апарати сухого очищення в основному використовуються циклони, електрофільтри і рукавні фільтри [25]. Зазначені види апаратів сухого очищення використовуються для уловлювання зважених твердих речовин, але не здатні ефективно працювати з газовими потоками, які містять легкозлипливі, смолисті речовини та дрібнодисперсний пил.

Апарати мокрого пилогазоочищення представлені в основному розпилюючими та тарілчастими скруберами, апаратами вихрового типу та

іншими конструкціями [375]. В основному, мокре очищення не вимагає додаткової підготовки газів, дозволяє одночасно проводити очищення як від газових викидів, так і дисперсних частинок. Мокре пиловловлення має високу ефективність при вловлюванні дрібнодисперсного пилу, але проблема очищення газів від легкозлипливих і смолистих речовин унеможлиблює ефективне використання апаратів мокрого типу.

Питання аналізу основних типів пилогазоочисного обладнання та систем обробки баз даних цього обладнання широко представлені в науковій літературі. Зведені характеристики обладнання та параметри технологічного процесу вимагають багато часу для обґрунтованого рішення щодо вибору обладнання [376–379]. Складність запропонованих підходів полягає в громіздкості баз даних обладнання, обмеженому переліку характеристик забруднюючих речовин та вузькій спрямованості вибору обладнання на відповідність, головним чином, технічним вимогам [380].

Аналіз основних типів пилогазоочисного обладнання широко представлений у науковій літературі, але питання оптимального вибору певних конструкцій апаратів з урахуванням реальних умов технологічного середовища та характеристик забруднюючих речовин потребує подальшого дослідження.

Захист та збереження навколишнього середовища є ключовими цілями сталого розвитку суспільства, тому питання вибору оптимальних технологічних рішень очищення викидів зумовлює необхідність розробки програмних рішень та актуальність дослідження напрямків зниження навантаження на навколишнє середовище.

Проблема обґрунтованого вибору оптимального пилогазоочисного обладнання полягає в тому, що необхідно враховувати параметри забруднюючих речовин та умови середовища проведення процесу очищення.

У загальному вигляді методика вибору оптимальних технологічних рішень для очищення пилогазових викидів можна представити на рис. 4.1. Схема є сукупністю трьох елементних блоків:

- забруднююча речовина;
- технологічні умови середовища;
- пилогазоочисне обладнання.

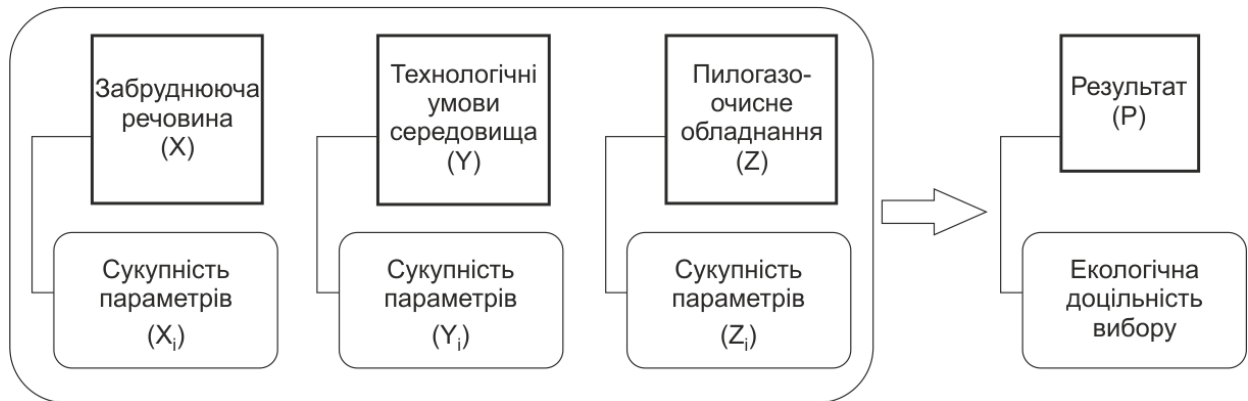


Рисунок 4.1 – Схема умов вибору природоохоронного обладнання

Співвідношення цих блоків між собою дає певний еколого-технологічний результат застосування технологічного рішення у разі конкретної забруднюючої речовини.

Кожний із наведених блоків (X, Y, Z) можна уявити сукупністю характеристик його параметрів ( $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ ).

#### 4.1.1 База даних забруднюючих речовин

База даних забруднюючих речовин. База даних забруднюючих речовин сформована у вигляді двомірної матриці розміром  $i \times j$  (рис. 4.2), де  $i$  – кількість забруднюючих речовин, у матриці;  $j$  – кількість різних за фізико-хімічними характеристиками різновидів конкретної забруднюючої речовини у матриці. Так як різні типи пилогазоочисного обладнання можуть мати свої переваги та недоліки в залежності від властивостей забруднюючих речовин база містить інформацію про певний перелік забруднюючих речовин, враховуючи їх різноманіття, фізико-хімічні та санітарно-гігієнічні параметри, необхідні для прийняття зважених рішень щодо вибору обладнання.

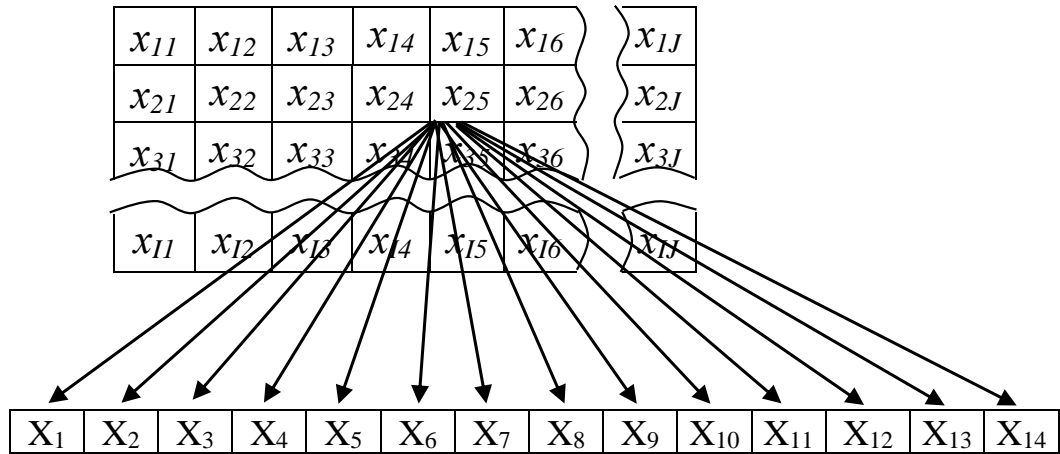


Рисунок 4.2 – Матриця об'єктів підмножини забруднюючих речовин.

Кожна комірка  $x_{ij}$  двомірної таблиці є характеристикою  $i$ -го забруднюючої речовини (порядковий номер у матриці по горизонталі)  $j$ -го різновиду (порядковий номер у матриці по вертикалі) і включає наступні параметри:

Виходячи з мети необхідного дослідження, визначається вага різних характеристик забруднюючих речовин – можливий як технологічний, так і санітарно-гігієнічний напрям дослідження. Інформація цієї бази даних формується на підставі інвентаризації виробництв, умов технологічних процесів та довідкових даних щодо певних забруднюючих речовин.

Перший стовпець – назва (код) забруднюючої речовини.

$X_1$  - агрегатний стан забруднюючої речовини. Цей параметр впливатиме на вибір методу очищення викидів виробництва. Різні методи очищення можуть бути ефективні для різних агрегатних станів забруднюючих речовин. Для зручності подальших розрахунків було прийнято, що твердий стан приймаємо рівним 0, рідкий та газоподібний – 1.

$X_2$  - дисперсність забруднюючої речовини, мкм. Цей параметр обмежуватиме використання апаратів, де можливий «проскок» частинок певного розміру та, відповідно, впливає на ефективність роботи

технологічного обладнання. Найефективніші методи очищення можуть бути розроблені для конкретного розміру та форми часток забруднюючих речовин.

$X_3$  - щільність забруднюючої речовини,  $\text{мг}/\text{см}^3$ . Це фізичний параметр досліджуваного речовини, який береться виходячи з довідникових чи лабораторних даних, і безпосередньо впливає на правильний вибір очисного обладнання. В залежності від щільності забруднююча речовина може бути вловлена в апаратах різного принципу дії – за допомогою градієнта щільності або швидкості.

$X_4$  – форма частинок забруднюючої речовини. Даний параметр будемо застосовувати для опису фізичної форми твердих забруднюючих речовин, яка може впливати на динамічну поведінку потоку забрудненого повітря всередині газоочисного обладнання та траєкторію його руху. Форма частинок може впливати на дифузію та адгезію забруднюючих речовин в різних частинах очисного обладнання, що може відобразитися на ефективності методу очищення. Для ізометричної форми частинок приймемо значення 3, пластинчастих частинок – 2, волокон – 1.

$X_5$  – клас небезпеки забруднюючої речовини. Це санітарно-гігієнічний параметр, який приймається залежно від чинних санітарних норм у діапазоні від 1 до 4. Небезпечні, токсичні і вибухонебезпечні речовини вимагають спеціальних заходів щодо їх видалення. Ці заходи можуть включати встановлення спеціального обладнання, яке здатне ефективно затримувати та видаляти небезпечні речовини.

$X_6$  – вплив на організм людини. Це санітарно-гігієнічний параметр, який залежить від наслідків впливу забруднюючої речовини на організм людини. Для речовин, що викликають подразнення/пошкодження шкіри, приймаємо значення 3, респіраторну/фіброгенну дію – 2, отруйну/канцерогенну дію – 1.

$X_7$  – хімічний склад забруднюючої речовини, який використовуватиметься як інформаційне відображення складу речовини та для можливих хімічних реакцій в апаратах хемосорбції.



$X_8$  – гранично допустима концентрація забруднюючої речовини, мг/м<sup>3</sup>. Це санітарно-гігієнічний параметр, який вказуватиме на потенційну небезпеку забруднюючої речовини для людини.

$X_9$  – злипання частинок забруднюючої речовини, виражене через механічну напругу на розрив шару частинок, Па. Цей параметр для пилогазоочисного обладнання має як позитивний, так і негативний ефект. З одного боку, злипання частинок забруднюючих речовин в пилогазоочисному обладнанні може бути бажаним процесом, оскільки це дозволяє збільшити розмір частинок та знизити їх концентрацію у вихідному потоці. Це може поліпшити ефективність очищення та зменшити шкідливі впливи на довкілля. З іншого боку, злипання частинок забруднюючих речовин може призвести до утворення відкладень, які можуть привести до забивання фільтру або інших частин пилогазоочисного обладнання. Це може зменшити ефективність очищення та збільшити ризик викиду забруднюючих речовин в атмосферу.

$X_{10}$  – горючість частинок забруднюючої речовини. Цей параметр є обмеженням для використання обладнання, що містить горючі матеріали та високу температуру експлуатації. Для горючих речовин приймаємо значення 1, негорючих – 0.

$X_{11}$  – змочуваність частинок забруднюючої речовини, °. Це фізичний параметр, який визначається для твердих забруднюючих речовин у лабораторних умовах. Частинки з високою змочуваністю легше очищуються методами, які використовують мокре очищення.

$X_{12}$  – розчинність у воді забруднюючої речовини, яка може впливати на процес уловлювання речовин в апаратах мокрого типу. Для розчинних речовин приймаємо значення 2, слаборозчинні – 1, нерозчинні – 0.

$X_{13}$  – здатність до поглинання забруднюючої речовини (сорбція) компонентів навколишнього середовища. Для речовин-сорбентів приймаємо значення 1, не здатних до поглинання речовин – 0.

$X_{14}$  – здатність забруднюючої речовини вступати у хімічну реакцію. Цей хімічний параметр спричиняє можливість застосування мокрих способів

очищення (хемосорбції) з нейтралізацією забруднювача. Реакційно-здатні речовини – 1, нездатні до реакції – 0.

Перелік фізико-хімічних та санітарно-гігієнічних параметрів забруднюючих речовин можна розширити залежно від бажаного кінцевого результату вибору технологічного рішення.

Для узагальнення інформації щодо бази даних забруднюючих речовин наведемо базу даних для конкретних забруднюючих речовин підприємств теплоенергетики та хімічної промисловості (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Приклад бази даних забруднюючих речовин у теплоенергетиці та хімічній галузі

Забруднююча речовина	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>
Аерозоль двоокису титану	0	0,26	2920	3	4	2	TiO <sub>2</sub>	10	780	0	36	0	0	0
Пил ільменіту	0	7,20	3600	3	4	2	FeTiO <sub>3</sub>	10	320	0	72	0	0	0
Діоксид сірки	1	-	2,619	-	3	2	SO <sub>2</sub>	10	-	0	-	2	1	1
Діоксид азоту	1	-	2,052	-	3	2, 3	NO <sub>2</sub>	2	-	0	-	2	1	1
Сірчана кислота	1	-	1836	-	2	1, 2, 3	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	-	0	-	2	1	1
Діоксид вуглецю	1	-	1,839	-	4	2	CO <sub>2</sub>	3	-	0	-	2	1	1

#### 4.1.2 База даних технічних умов середовища

База даних параметрів технологічного середовища. За аналогією формуємо базу даних як матрицю параметрів середовища (умов для забезпечення процесу очищення) під час надходження викидів, що містять

забруднюючі речовини від джерела викиду. Матриця умов враховуватиме наступні параметри:

Перша колонка – порядковий номер конкретної варіації умов навколишнього середовища, що характеризуються набором певних фізичних параметрів і технологічних умов середовища проведення процесу очищення після викиду забруднюючих речовин для визначення вибору необхідних параметрів для реалізації технічних рішень.

$Y_1$  – умова вмісту води у викиді, що містить забруднюючі речовини. Для вологомістких викидів приймемо значення 1 (маємо на увазі що забруднюючі речовини викидаються разом з істотним супутнім вмістом води), сухий викид забруднюючої речовини – 0. Використання цього параметру суттєво впливає на вибір подальшого способу технологічного процесу очищення викидів (суха або мокра очистка) з бази технологічного обладнання.

$Y_2$  – умова максимального обсягу викидів,  $m^3/год$ . Цей технологічний параметр впливатиме на вибір певного технологічного рішення з урахуванням його максимальної паспортної пропускної спроможності і визначає максимальний обсяг газів, який може бути очищений за одиницю часу.

$Y_3$  – умова максимального значення температури викиду забруднюючих речовин,  $^{\circ}C$ . Викиди, що містять велику кількість твердих частинок, можуть бути ефективно очищені при високих температурах, оскільки це забезпечує кращу в'язкість та меншу пилоподібність частинок. Викиди, що містять велику кількість водяної пари, можуть бути ефективно очищені при нижчих температурах, оскільки це дозволяє уникнути конденсації водяної пари та підвищення вологості у системі. Цей параметр обмежуватиме вибір технологічного обладнання за температурним режимом очищення.

$Y_4$  – умова наявності сторонніх домішок окрім конкретної забруднюючої речовини. За наявності сторонніх домішок приймаємо значення, що дорівнює 1, за відсутності сторонніх домішок – 0. Цей технологічний параметр може ускладнювати процес очищення від речовин, здатних вступати в хімічну

реакцію і вимагає, як варіант, використання більш комплексних технологічних рішень.

Узагальнення матриці параметрів технологічних умов середовища наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – База даних технологічних умов середовища

Тип умов	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
1 варіант	0	3000	100	0
2 варіант	0	30000	250	0
...	...	...	...	...
n варіант	0 або 1	...	...	0 або 1

#### 4.1.3 База даних пилогазоочисного обладнання

База даних параметрів пилогазоочисного обладнання. Третім ключовим блоком дослідження з розробки алгоритму є формування матриці параметрів пилогазоочисного обладнання, яке може бути використане для видалення забруднюючих речовин (або є в наявності на конкретному промисловому підприємстві чи потенційно можливого для використання) і враховує такі параметри:

Перша колонка – назва пилогазоочисного обладнання.

$Z_1$  – параметр апарату, який відповідає за можливість сухого або мокрого способу очищення. Для апаратів мокрого типу приймаємо значення 1, для сухого типу – 0. За ступенем важливості це вагомий показник, який пропонуємо використовувати першим для подальшого підбору технологічних рішень.

$Z_2$  – максимальне навантаження апарату по газовій фазі, м<sup>3</sup>/год. Цей технологічний параметр характеризуватиме пропускну здатність апарату з очищення пилогазового потоку забруднюючої речовини.

$Z_3$  - гідравлічний опір апарату, Па. Цей технологічний параметр обладнання враховує втрати енергії під час проходження пилогазового потоку в процесі очищення через апарат.

$Z_4$  – допустима концентрація забруднюючої речовини на вході в апарат, г/м<sup>3</sup>. Цей технологічний параметр характеризує здатність стабільної роботи обладнання при певних концентраціях забруднюючої речовини в викидах, що подаються на очищення.

$Z_5$  – мінімальне значення концентрації забруднюючої речовини на виході з апарату, мг/м<sup>3</sup>. Цей параметр залежить від ефективності роботи обладнання за оптимальних параметрів робочого процесу.

$Z_6$  – ефективність уловлювання за фракційним складом частинок забруднюючої речовини (мінімальний розмір часток), мкм. Цей технологічний параметр відноситься до твердих забруднюючих речовин, які можуть бути уловлені в певному пилогазоочисному обладнанні з урахуванням можливих механізмів осадження.

$Z_7$  – верхня температурна межа можливої роботи апарату, °С. Цей технологічний параметр може бути використаний як температурне обмеження для використання певних умов середовища та властивостей забруднюючих речовин.

$Z_8$  – максимальна швидкість газу у перерізі апарату, м/с. Цей параметр залежить від різних конструкційних особливостей обладнання. Наприклад, для скрубера Вентурі це буде максимальна швидкість газу в перерізі до конфузору, для тарілчастих апаратів – швидкість газу у перерізі апарату між сусідніми тарілками.

$Z_9$  – витрата поглинаючої рідини, м<sup>3</sup>/годину. Цей параметр застосовується для апаратів мокрого очищення та характеризує максимальну витрату поглинаючої рідини для процесів осадження/хемосорбції забруднюючих речовин.

$Z_{10}$  – параметр обладнання, який відповідає за можливість роботи із злипливими частинками забруднюючої речовини. Для апаратів здатних

ефективно працювати із злипливими частинками, прийmemo значення 1, для апаратів, які не здатні очистити газовий потік від злипливих частинок – 0.

Узагальнення бази даних пилогазоочисного обладнання наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – База даних пилогазоочисного обладнання

Найменування пилогазоочисного обладнання	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>
Електрофільтр типу ЕГУ (ЕГУ1-7/400-4-4/2.56-2-11.2)	0	36200	200	90	50	0,1	330	1	-	1
Електрофільтр КХП ЭСТ-11,4-4-Ш	0	40500	200	6	20	0,1	330	1	-	1
Рукавний фільтр ФРІР-25	0	2400	2000	10	20	0,3	135	0,55	-	0
Рукавний фільтр ФРІР-1200	0	110000	2000	10	20	0,3	135	0,55	-	0
Двоступінчастий фільтр тонкої очистки СРФ5КР*6 (6 секцій)	0	30000	2500	120	1	1	240	0,15	-	0
Батарейний циклон БЦ-512 (односекційний)	0	6500	1300	75	10000	10	400	4	-	1
Скрубер Вентурі СВ 150/90-800	1	7000	1200	30	500	1	400	5	7	1
Апарат з провальними тарілками великих отворів ПТВО (d <sub>o</sub> = 0,06 m)	1	40000	1200	20	50	0,25	400	3,5	10	1
Скрубер з рухомою насадкою ШВ-50	1	50000	3500	30	100	1	300	10	10	1
Апарат з РПН (висхідний прямоток)	1	50000	1000	30	50	0,25	300	12	3	1

За необхідності база обладнання може бути розширена з урахуванням різного додаткового обладнання або його параметрів. Важливим не експлуатаційно-технічним додатковим параметром може бути вартість у випадку відповідності кількох типів апаратів умовам вихідної задачі ( $Z_{11}$ ).

#### 4.2 Вибір природозахисного обладнання з використанням графів

Побудову графу в роботі виконано в програмному середовищі Gephi, на основі алгоритму зниження розмірності, а саме за допомогою методики UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) [347]. Цей алгоритм побудовано на засадах ріманової геометрії і топологічної алгебри. UMAP зберігає найбільшу частину глобальної структури з чудовою продуктивністю під час його виконання. До параметрів алгоритму належать: визначення кількості сусідів, мінімальна відстань, метрика відстані, розмірність кінцевого простору.

Для побудови графу використаємо бази даних досліджуваних параметрів системи вибору пилогазоочисного обладнання (ВПО) у вигляді матриць елементів (табл. 4.1–4.3).

Вибір лінійної структури системи очищення викидів забруднюючих речовин однозначно задається у символній формі:

$$X_{ij}; Y_{ij}; Z_{ij}, \quad (4.1)$$

де  $X_{ij}$  – вибір забруднюючої речовини;

$Y_{ij}$  – вибір умов перебігу процесу;

$Z_{ij}$  – вибір пилогазоочисного обладнання.

Вибір забруднюючої речовини визначається з матриці забруднюючих речовин (табл. 4.1) з урахуванням вихідних умов певного технологічного об'єкту. Вибір умов перебігу процесу очищення визначається на підставі матриці технологічних умов та параметрів середовища (табл. 4.2), яка

формується на основі вихідних даних технологічного процесу або інших прогнозованих параметрах.

Наступний крок в утворенні структури – це підбір пилогазоочисного обладнання, яке буде відповідати умовам проведення процесу очищення викидів певних забруднюючих речовин, з оптимальними показниками відповідності (табл. 4.3).

Такі взаємозв'язки представлені у вигляді морфологічного графа (рис. 4.1), який дозволяє відобразити одночасне перетворення. Для цього необхідні чіткі умови, що однозначно описують можливість наслідування структурних елементів та варіантних особливостей в сукупності предметного переліку. Сукупність параметрів (елементів) груп  $X_{ij}$ ,  $Y_{ij}$ ,  $Z_{ij}$  формується на підставі матриць (табл. 4.1–4.3).

З огляду на кількість елементів в кожній групі, можна очікувати значної кількості комбінацій ключових характеристик і варіантів вибору пилогазоочисного обладнання. В якості попереднього кроку нам необхідно визначити основні правила, за якими об'єкти можуть бути згруповані разом. Ми будемо використовувати закони математичної логіки для викладу загальних підходів до формування теорії вибору пилогазоочисного обладнання, будуючи висловлювання за допомогою логічних відносин. В цьому випадку доцільність вибору певного апарату складається з елементів графа морфологічних ознак, а в формалізованій формі, кожен тип системи ВПО буде являти собою складне висловлювання, яке складається з простих елементів за допомогою дій, які можуть бути змістовно виражені як «і» (з'єднання), відоме як кон'юнкція; «або» (заміна), відоме як диз'юнкція.

Далі аналізуються параметри ЗР та умови середовища на відповідність певному варіанту пилогазоочисного обладнання. На мові математичної логіки це означає, що необхідно врахувати одночасно значення цих трьох складових. Для цього скористаємося логічною операцією «і» ( $\wedge$ ) як показано на зразку далі



$$\left[ \begin{array}{c} \left( (X_{0i} \wedge Y_{0j}) \wedge Z_{mn}^k \right) \vee \left( (X_{0i} \wedge Y_{0j}) \wedge Z_{(m+1)(n+1)}^{k+1} \right) \vee \dots \\ \left( \left( (X_{0(i+1)} \wedge Y_{0(j+2)}) \wedge Z_{(m+2)(n+2)}^{k+2} \right) \wedge N_{extr} \wedge \Pi_{extr} \right) \vee \\ \dots \\ \left( X_{0i} \wedge Y_{0j} \wedge Z_{mn}^k \wedge N_{extr} \wedge \Pi_{extr} \right) \end{array} \right], \quad (4.2)$$

де  $i, j, k, l, m, n, p = 1, 2, 3, \dots$ ;

$N_{extr}$  – обсяг викидів;

$\Pi_{extr}$  – максимальне навантаження по газовій фазі.

Наприклад, для очистки викидів аерозолів двоокису титану обсягом 30000 м<sup>3</sup>/год за умов не перевищення температури середовища вище 400°C ми використовуємо апарат з РПН (який також підійде з урахуванням обмеження по дисперсності частинок ЗР):

$$\left[ \left( \left( (X_{01} \wedge Y_{02}) \wedge Z_9^0 \right) \wedge N_{30000} \wedge \Pi_{40000} \right) \right]. \quad (4.3)$$

Таким чином, за допомогою алгебри висловлень сформульовано поступовість і наслідування роботи алгоритмічної програми розрахунку оптимального ВПО на підставі параметрів забруднюючих речовин та умов середовища проведення процесу очищення.

Наведений математичний запис обґрунтування ВПО представляє поступові перетворення між його складовими. Такі взаємозв'язки доцільно представити у вигляді графа, який дозволяє відобразити одночасне перетворення однієї складової в декілька інших за допомогою відповідної кількості ребер графа, які виходять із однієї вершини. Порядок відображення вершин графа повинен бути однозначним, щоб забезпечувати послідовність зміни як константних, так і варіантних елементів.

Результат застосування програми представлено на наступному графі (рис. 4.3).

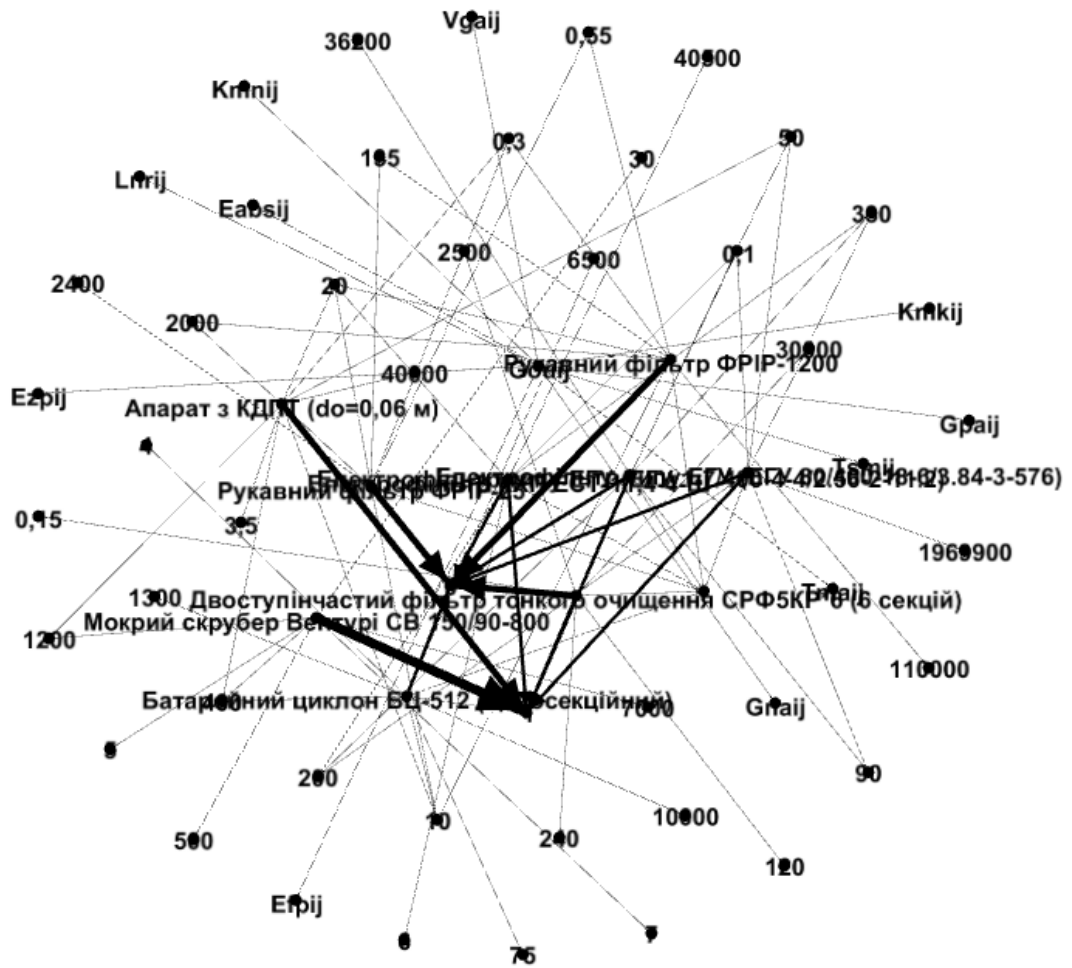


Рисунок 4.3 – Направлений граф процесу обґрунтування вибору пилогазоочисного обладнання

Візуалізації графа вказують на вибір більш оптимального технологічного обладнання для очищення певних забруднюючих речовин з урахуванням умов параметрів середовища, де повинен відбуватись цей процес. Основною, що лежить в основі побудови ребер графа є прямий зв'язок між елементами баз даних. Аналіз елементів на критичну важливість показує, вилучення чи залучення якого конкретного інформаційного сегменту може порушити зв'язність всієї мережі, або збільшити навантаження на інші системи. Перевагою застосування теорії графів є можливість комплексного представлення взаємозв'язків між об'єктами, виявлення функціональних залежностей та побудови відповідної математичної моделі.

### 4.3 Параметризована оптимізація вибору обладнання

Застосування методики використання графів (пункт 4, розділу 2) для параметричної оптимізації можливе за умови зіставлення «чистих викидів» і методів. Однак у реальних умовах виробництва методи очищення істотно відрізняються один від одного, крім того, дисбаланс вносить фізичний та хімічний склад забруднюючих речовин. Тому, параметризовану оптимізацію доцільно проводити у вигляді графа спрямованого вибору пилоочисного апарату (рис. 4.4), що реалізується  $n$  кількістю методів.

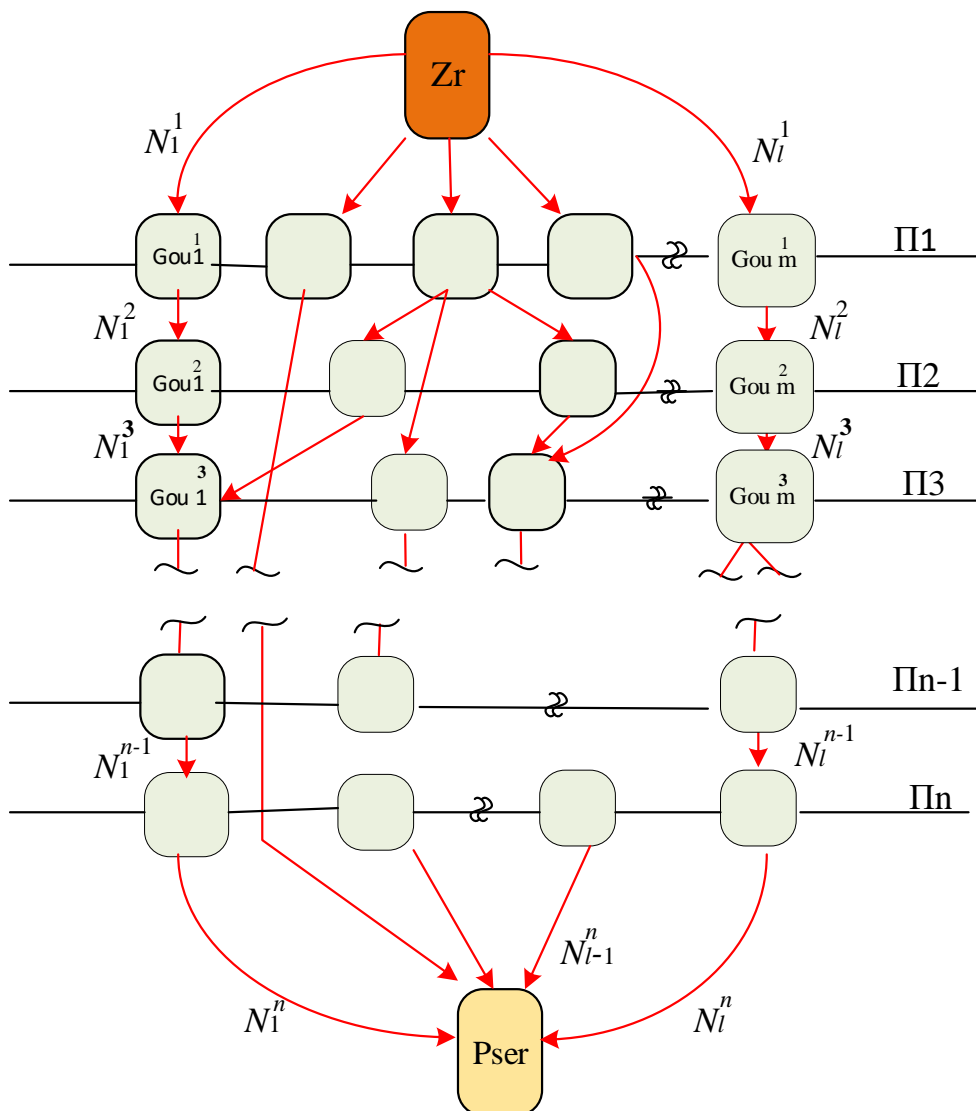


Рисунок 4.4 – Граф вибору апарату пилогазоочиснення

На графі введено наступні позначення:

$Z_r$  – забруднююча речовина;

$P_{ser}$  – параметри середовища;

$\Pi_1 \dots \Pi_n$  – методи за заданою потужністю (рівні графа);

$Gou_1 \dots Gou_m$  – пилогазоочисне обладнання, що здатне реалізувати дані методи (вершини графа);

$N_1 \dots N_l$  – кількість викидів (ребра графа).

У цьому випадку математична модель процедури спрямованого вибору представляється у вигляді гіперпризми, площини якої відповідають методам досягнення чистоти повітря, а самі площини є матрицями технологічного обладнання та відповідними їм матрицями середовища та кількості викидів (рис. 4.5–4.7, табл. 4.4).

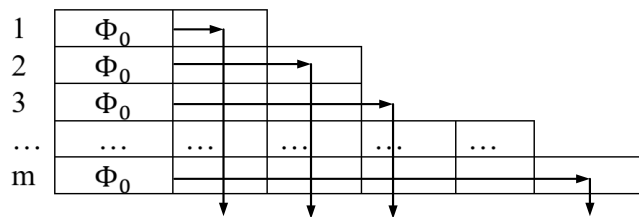


Рис. 4.5 – Схема можливих варіантів розв’язків

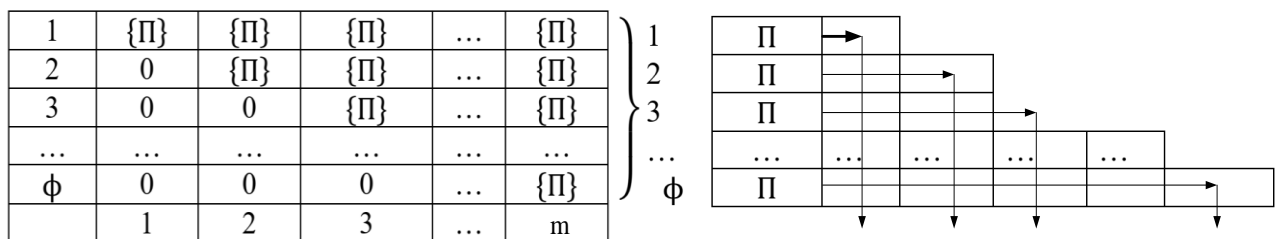


Рисунок 4.6 – Схема можливих варіантів потужності технологічного обладнання

Запропонована модель дозволяє побудувати матрицю суміжності методів  $A=[a_{i,j}]$  (рис. 4.8), яка має розмірність  $m \times n$  за кількістю аналізованих методів

та складності розв’язання задачі і визначається так:  $a_{ij} = 1$ , якщо існує зв’язок між методами при вказаній потужності  $(P_i, P_j)$ ;  $a_{ij} = 0$ , якщо зв’язку немає.

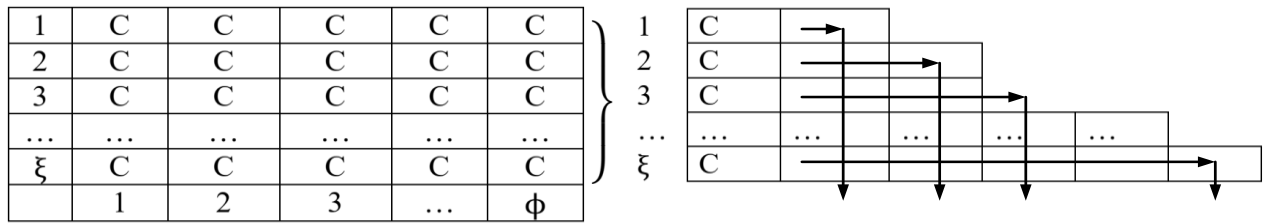


Рисунок 4.7 – Набір пилогазоочисних апаратів для реалізації очищення при заданій потужності

Таблиця 4.4 – Можливі варіанти спроможності пилогазоочисних апаратів реалізувати необхідні методи при заданій потужності

1	N	N	N	N	N
2	N	N	N	N	N
3	N	N	N	N	N
...	...	...	...	...	...
v	N	N	N	N	N
	1	2	3	...	xi

A=

0	0	0	1	0	...	0	1
0	0	1	0	0	...	0	2
1	0	0	0	0	...	0	3
0	0	0	0	1	...	0	4
0	0	0	0	0	...	1	5
...	...	...	...	...	...	...	...
0	1	0	0	0	...	0	m
П1	П2	П3	П4	П5	...	Пn	

Рисунок 4.8 – Матриця суміжності рівнів

Заповнення матриці відбувається горизонтально. Відповідно до графа реалізації даної задачі (рис. 4.4), рядок матриці відповідає набору методів, а стовпець визначає складність розв’язання задачі (кількість етапів).

Матриця суміжності методів будується під кожен гілку графа з висячою вершиною. Останній рядок, в якому є «1», відповідає нижньому рівню розбиття завдання.

Відповідно до матриць суміжності, будуюмо мережеву модель вибору обладнання (рис. 4.9). Вузли мережі є методами, відрізки шляху відповідають параметрам забруднюючих речовин та умовам середовища.

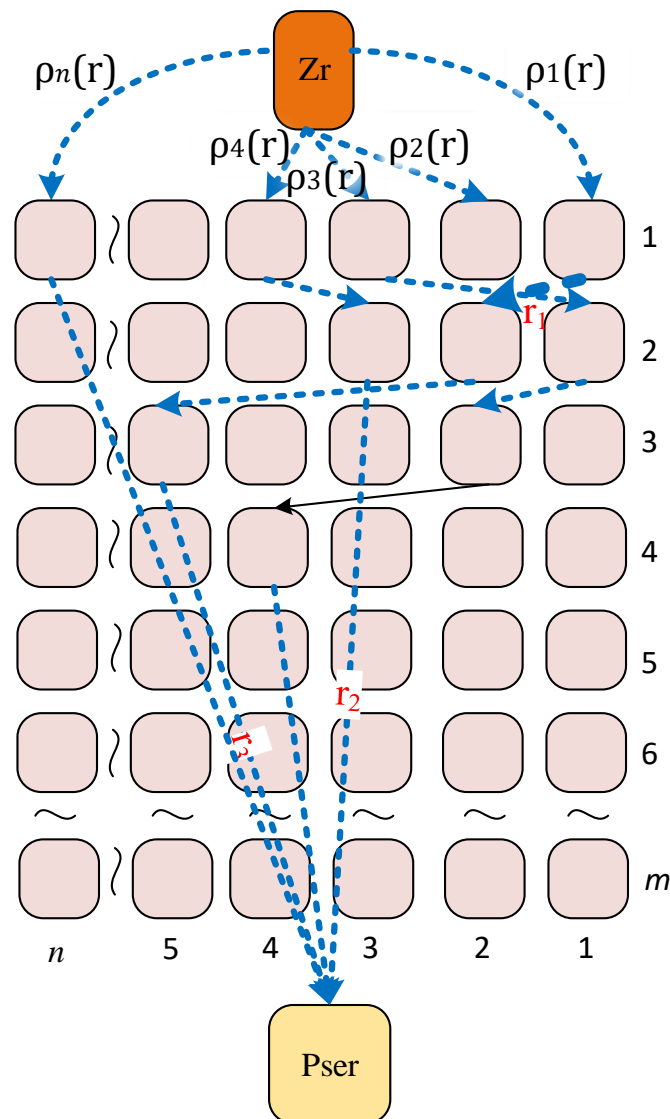


Рисунок 4.9 – Мережева модель вибору обладнання

Спрямований вибір обладнання полягає у визначенні найкоротшого шляху цієї мережевої моделі. Якщо в якості вагової функції ( $\rho$ ) прийняти

оптимальний апарат, що відображає ваги на відрізках мережі, то весь шлях  $r = \langle r_0, r_1, \dots, r_k \rangle$  дорівнює сумі ребер, що входять до нього:

$$\rho(r) = \sum_{i=1}^k \rho(r_{i-1}, r_i). \quad (4.4)$$

В цьому випадку вага найкоротшого шляху з витoku  $Zr$  в стік  $Pser$  визначатиметься співвідношенням:

$$\Delta(Zr, Pser) = \begin{cases} \min \{\rho(r): Zr \xrightarrow{r} Pser\}, \\ \infty, \text{ в протилежному випадку.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Оптимізаційна задача розв'язується методом лінійного програмування. При цьому враховується наступний критерій оптимізації:

$$\rho = f(\alpha, \beta), \quad (4.6)$$

де  $\alpha$  – параметр, який залежить від методу очищення при заданій потужності (табл. 4.3 [129, 381]);  $\beta$  – набір обмежень умов середовища та фізико-хімічного складу забруднюючих речовин (табл. 4.1, 4.2 [109, 381]).

Необхідна умова існування технологічного процесу:

$$\exists_{\varepsilon \in \theta} \Phi_{0\varepsilon} = \bigcap_{\psi=1}^m \Omega^\psi \{ \Phi_i \} \vee_{\varphi=1 \div \varphi} \exists \Pi_\varphi \vee_{\xi=1 \div \chi} \exists C_\xi \vee_{v=1 \div r} \exists N_v, \quad (4.7)$$

де  $\exists_{\varepsilon \in \theta} \Phi_{0\varepsilon}$  – існуючий варіант розв'язання задачі;

$\bigcap_{\psi=1}^m \Omega^\psi \{ \Phi_i \}$  – сукупність етапів розв'язання задачі;

$\exists_{\varphi=1 \div \varphi} \Pi_\varphi$  – наявність методів розв'язання задачі на кожному етапі при

зазначеній потужності;

$\exists_{\xi=1 \div \chi} C_\xi$  – спроможність очисних апаратів реалізувати необхідні методи;

$\exists_{v=1 \div r} N_v$  – кількість та якість викидів, які знешкоджуються методом використання певного типу пилогазоочистного обладнання. При цьому множина розв'язків на якісному рівні задовольнятиме достатню умову:

$$\forall_{k \in X} \Phi_{0k} = \{ \Phi_0 | \beta_{\Phi_0}^{\min} \leq \beta_{\Phi_0} \leq \beta_{\Phi_0}^{\max} \}. \quad (4.8)$$

Тобто для всіх існуючих варіантів розв'язання задачі критерії якості процесу повинні знаходитися в області допустимих значень як діапазону кількості викидів, потужністю апарату, можливістю ефективно працювати, так і обмежень для умов середовища проведення процесу.

У цьому випадку при виконанні необхідної та достатньої умови формується множина розв'язків:

$$\{O_{\Phi_0}\} = \cup_{k \in X} \left\{ O_{\Phi_0}(k) \left| \begin{array}{l} \exists_{\varepsilon \in \theta} \Phi_{0\varepsilon} = \bigcap_{\psi=1}^m \Omega^{\Psi} \{ \Phi_i \} \forall_{\phi=1 \div \varphi} \Pi_{\varphi} \\ \forall_{\xi=1 \div \chi} C_{\xi} \forall_{v=1 \div r} N_v, \\ \forall_{k \in X} \Phi_{0k} = \{ \Phi_0 | \beta_{\Phi_0}^{\min} \leq \beta_{\Phi_0} \leq \beta_{\Phi_0}^{\max} \} \end{array} \right. \right\}. \quad (4.9)$$

Оптимізаційна задача подається виразом:

$$\Phi_0^{\text{opt}} = \lim_{O_{\text{обл}} \rightarrow \min} \Phi_0 | O_{\text{обл}} \in \{C_{\Phi_0}\}. \quad (4.10)$$

Таким чином, оптимальним приймається той варіант технологічного обладнання для очищення від викидів певних забруднюючих речовин, що відповідає критеріям мінімального вибору пилогазоочистного обладнання при найбільшій ефективності уловлення домішок забруднюючих речовин. Вибір оптимального пилогазоочистного обладнання для очищення повинен враховувати не лише ефективність очищення, але й вартість обладнання, його енергоефективність та технічні характеристики.



#### 4.4 Розробка програмного алгоритму вибору обладнання

Для розробки програмного алгоритму вибору технологічних рішень скористаємося методом послідовної ієрархічної кластеризації (ПІК) [382]. Відповідно до принципів математичної логіки заданий елемент (об'єкт) з урахуванням його характеристик можна подати у вигляді кластерної дендрограми (рис. 4.10), де кожен кластер відповідає за певний параметр.

Для кількісної оцінки відмінностей між варіантами кластеризації можуть використовуватися кофенетична кореляція (cophenetic correlation) або різні рангові індекси. Ранжування (ієрархія) гілок дендрограми має враховувати важливість технічних та екологічних характеристик заданого елементного блоку.

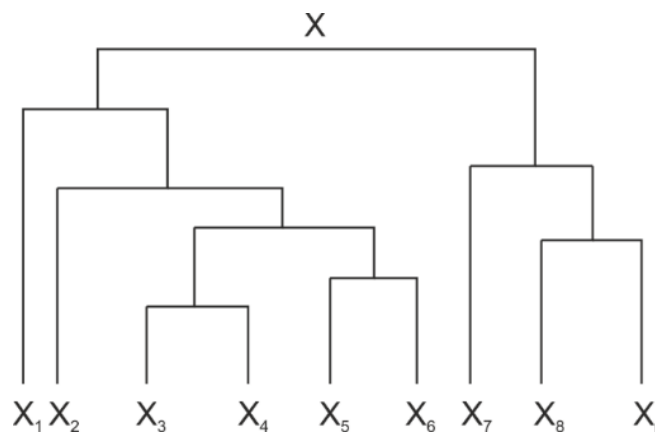


Рисунок 4.10 – Кластерна дендрограма об'єкта X

Використання головних компонентів ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) для ієрархічної кластеризації – один із можливих шляхів гібридизації алгоритмів, яка все частіше привертає увагу фахівців. Переваги ієрархічних кластер-процедур:

- у порівнянні з іншими кластер-процедурами вони дають більш повний та тонкий аналіз структури досліджуваної множини спостережень;
- є можливість наочної інтерпретації проведеного аналізу на основі дендрограми.

З урахуванням послідовних ієрархічних зіставлень кластерів елементів  $(X_i, Y_i, Z_i)$  (рис. 4.1) отримаємо уточнену блок-схему умов вибору технологічного устаткування (рис. 4.11).

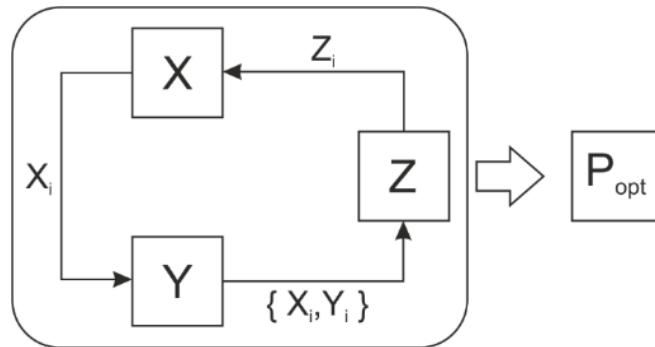


Рисунок 4.11 – Схема послідовного підбору кластерів умов вибору технічного рішення

Умови вибору кожного з оптимальних параметрів  $(Z_i^{opt})$  пилогазоочисного обладнання відповідають рівнянню:

$$Z_i^{opt} = f(X_i, Y_i). \quad (4.11)$$

В результаті підбору всіх параметрів пилогазоочисного обладнання на відповідність умовам технологічного середовища та характеристикам забруднюючих речовин кінцевий результат від різноманітних конфігурацій апаратів можна представити виразом:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{opt} \in \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i\} - opt. \quad (4.12)$$

Для спрощення та доступності програмного алгоритму реалізації оптимального вибору технологічних рішень для зменшення викидів у повітря використовували сервіс Google – Google-Таблиці.

Для реалізації програмного алгоритму вибору технологічних рішень у середовищі Google-Таблиці сформуємо бази даних досліджуваних параметрів системи вибору пилогазоочисного обладнання у вигляді окремих вкладок електронної таблиці (табл. 4.1–4.3).

Принцип роботи алгоритму послідовної ієрархічної кластеризації полягатиме у послідовному порівнянні різних параметрів (кластерів) трьох баз даних. Залежно від кінцевої мети порівняльного аналізу, можна ранжувати значення кластерів різних технічних або екологічних складових блоків X, Y, Z (рис. 4.11).

Аналіз кластерів баз даних забруднюючих речовин, технологічних умов середовища проведення процесу очищення і природозахисного обладнання проводимо з програмному середовищі сервісу Google-Таблиці. Цей сервіс доступний для всіх користувачів Google безкоштовно та не потребує встановлення додаткового програмного забезпечення. Також Google Таблиці можна запускати на будь-якому пристрої з Інтернетом. Використання цього сервісу дозволяє одночасно декільком користувачам вносити зміни до баз даних та паралельного спостереження за результатами аналізу, таблиці автоматично зберігають роботу та можуть бути доступні з будь-якого місця. Кінцевий програмний продукт зручно зберегти у форматі \*.xlsx для подальшої роботи на будь-якому пристрої, який підтримує цей формат даних.

Як приклад, розглянемо застосування даного алгоритму з метою оптимального підбору обладнання для очищення викидів об'ємом 5000 м<sup>3</sup>/годину при температурі 80 °С від дрібнодисперсних зважених частинок (аерозолі) двоокису титану, які будуть містити додаткову вологу та сторонні забруднюючі речовини.

З метою послідовного порівняння кластерів трьох баз даних використовуємо формальні умови ДОРІВНЮЄ, БІЛЬШЕ, МЕНШЕ, ДОРІВНЮВАТИМЕ, вбудовані логічні команди TRUE або FALSE (рис. 4.12) та таблиці істинності (рис. 4.13) для перевірки результатів порівняння.

			equals	more	more	more					less			equals		equals	equals		less	
	Z1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	Y1	Y2	Y3	Y4	
	0	0	0	0	0					<300			0		0	0		400		
	0	0,26	2920	3	4	2	TiO2	10	780	0	36	0	0	0	1	5000	80	1		
17	18	FALSE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	FALSE	TRUE	TRUE	TRUE	

Рисунок 4.12 – Умови відповідності параметра Z<sub>1</sub> параметрам баз даних X, Y.

		Z1=0	Z1=1	
FALSE	FALSE	no equipment	FALSE	FALSE
TRUE	FALSE	0	TRUE	FALSE
FALSE	TRUE	1	FALSE	TRUE
TRUE	TRUE	both fit	TRUE	TRUE
		Final value Z1		
FALSE	TRUE	1	FALSE	TRUE

Рисунок 4.13 – Таблиця істинності параметра Z<sub>1</sub>

На рис. 4.12 є порівняння параметра Z<sub>1</sub>=0 по 18 параметрам з баз X, Y. Паралельно проводимо підбір по Z<sub>1</sub>=1. У разі повної відповідності максимально можливо отримати 18 значень TRUE. У прикладі зіставлення на рис. 4.12 набули 17 значень TRUE. Паралельний розрахунок Z<sub>1</sub>=1 дав максимальний результат значень TRUE, тому проводимо наступний етап зіставлення параметрів Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, ..., Z<sub>10</sub> з параметрами баз даних X, Y.

Для зручності перегляду вихідних умов алгоритму підбору в сервісі Google-Таблиці окремо додано аркуш, в якому реалізовано можливість вибору забруднюючої речовини та умов середовища з баз даних X, Y (рис. 4.14).

	Column letter		D																	
	Column number in the table		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14				
	Parameter index		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14				
Pollutant selection	Titanium dioxide aerosol	1	0	0,26	2920	3	4	2	TiO2	10	780	0	36	0	0	0				
	Column letter		D																	
	Column number in the table		1	2	3	4														
	Parameter index		Y1	Y2	Y3	Y4														
Choice of conditions	1 variant	1	1	5000	80	1														

Рисунок 4.14 – Аркуш вихідних умов для вибору технічного рішення

В результаті послідовного порівняння параметрів трьох баз даних (X, Y, Z) отримали фінальні значення оптимальних параметрів  $Z_i$  для поставленого завдання. Застосування логічних фільтрів відповідності параметрів  $Z_i$  до бази обладнання призводить до рекомендованого результату застосування двох типів обладнання: апарату з регулярною пульсаційною насадкою (Apparatus with a regular pulsating nozzle) та апарату з провальними тарілками великих отворів (Apparatus with Large Holes Sieve Trays  $d_o = 0,06$  m) з 10 запропонованих технічних рішень в базі обладнання Z (рис. 4.15).

Rozrahunok .XLSX ☆ 📄 ☁

Файл Змінити Вигляд Вставити Формат Дані Інструменти Довідка Остання з

100% р. % .0 .00 123 За умовча... 10 B I ☞ A

fx

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Optimal parameters Zi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
		1	5000	Any value	Any value	10	0,26	80	Any value	-	1
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
	Apparatus with a regular pulsating nozzle	1	50000	1000	30	50	0,25	300	12	3	1
2	Apparatus with Large Holes Sieve Trays $d_o = 0,06$ m	1	40000	1200	20	50	0,25	400	3,5	10	1
3											
4											
5											
6											
7											
8											
a											

```
=FILTER('Equipment - Z'!B7:L105;
'Equipment - Z'!C7:C105=C3;
'Equipment - Z'!D7:D105>=D3;
'Equipment - Z'!G7:G105>=G3;
'Equipment - Z'!H7:H105<=H3;
'Equipment - Z'!I7:I105>=I3;
'Equipment - Z'!L7:L105=L3)
```

Рисунок 4.15 – Підсумковий підбір технічного рішення

Додатковий критерій вартості  $Z_{11}$ , віддає перевагу вибору апарату з РПН через його меншу матеріаломісткість, енергоспоживання й витрату рідини на зрошення, тому цей варіант розміщено на першому рядку програми. Висока

ефективність очищення від дрібнодисперсних зважених речовин в апараті з РПН потребує детальнішого вивчення теоретичних основ та експериментальних досліджень процесу пиловловлення на експериментальному лабораторному обладнанні.

В результаті проведеної роботи на 6 вкладках редактора Google-Таблиці реалізовано програму вибору оптимального пилогазоочисного обладнання для зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Розроблений алгоритм і програма вибору технічних рішень для очищення викидів забруднюючих речовин в атмосферу дозволяє будь-якому користувачу, у якого є доступ, майже миттєво отримати варіант розрахунку з наявної бази даних. У разі вибору з бази обладнання кількох технічних рішень, що задовольняють параметрам забруднюючої речовини та технічним умовам середовища проведення процесу, можливий вторинний вибір за матеріально-технічними або екологічними характеристиками обладнання.

Обґрунтування вибору природозахисного обладнання з точки зору Європейського законодавства базується на ряді нормативних актів, які стосуються охорони довкілля та забезпечення сталого розвитку. Найважливішим з цих актів є Регуляція Європейського Парламенту та Ради ЄС № 2018/841 про встановлення меж щодо викидів забруднюючих речовин у повітря, що ставить вимоги щодо встановлення кращих доступних технік для зменшення викидів забруднюючих речовин у повітря.

Забезпечення відповідності вимогам Директиви 2010/75/ЄС є обов'язковим для промислових підприємств в країнах-членах Європейського Союзу. Запропонована методика вибору природозахисного обладнання є обґрунтованою з точки зору відповідності вимогам Директиви 2010/75/ЄС, для якої важливим аспектом є технічні характеристики обладнання, такі як ефективність, надійність та економічність. Використання розробленої методики допоможе промислового підприємству запобігти можливим штрафам та скаргам від мешканців та організацій за шкідливий вплив на довкілля та забруднення навколишнього середовища.

#### 4.5 Висновки та узагальнення до розділу 4

1. В розділі проведено аналіз баз даних параметрів забруднюючих речовин, умов проведення процесу очищення викидів та параметрів пилогазоочисного обладнання. Дослідження вищезазначених баз даних дозволяє реалізувати обґрунтовані напрями з вибору природозахисного обладнання шляхом використання математичного та програмного системного підходу.

2. Розроблено методику вибору пилогазоочисного обладнання. За допомогою графів отримано швидке алгоритмічне пояснення орієнтованого оптимального вибору певних типів очисного обладнання. Запропонований метод враховує різні фізичні особливості роботи обладнання та дозволяє відповідно до кількості викидів та врахування умов середовища обирати найбільш ефективні технологічні природоохоронні рішення.

3. У розділі запропоновано та реалізовано методику вибору природозахисного обладнання для зниження викидів забруднюючих речовин теплоенергетики та хімічної галузі у програмному середовищі сервісу Google-Таблиці. Використання сервісу Google-Таблиці спрощує використання методики вибору обладнання і робить її доступною широкому числу користувачів на комп'ютерах з підтримкою файлів у форматі \*.xlsx або режимі онлайн.

Програмний алгоритм заснований на методі послідовної ієрархічної кластеризації та зіставленні параметрів трьох баз даних: характеристик забруднюючих речовин, технологічних умов середовища та параметрів пилогазоочисного обладнання. Послідовне зіставлення характеристик (кластерів) баз даних дозволяє отримати оптимальне значення характеристик технологічного рішення з урахуванням характеристик забруднюючої речовини та умов середовища цього процесу. З метою послідовного порівняння кластерів трьох баз даних використовували формальні умови ДОРІВНЮЄ, БІЛЬШЕ, МЕНШЕ, ДОРІВНЮВАТИМЕ, вбудовані логічні

команди TRUE або FALSE та таблиці істинності умов відповідності параметрів.

Програмний алгоритм вибору природоохоронного обладнання характеризується зручністю та швидкістю роботи, можливістю доповнення баз даних забруднюючих речовин та технологічного обладнання. Головною перевагою запропонованого методу є врахування відповідності вимогам регулювальних нормативних актів, таких як вимоги щодо встановлення кращих доступних технологій та зменшення викидів.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [125, 126, 129, 310, 381].



## РОЗДІЛ 5

### ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВЛОВЛЕННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ЗВАЖЕНИХ РЕЧОВИН

#### 5.1 Конструкції вискоефективного обладнання з РПН

Результати методики вибору пилоочисного обладнання (розділ 4) для очищення викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини вказують на високу ефективність і екологічність обладнання з регулярною пульсаційною насадкою (РПН).

В апаратах з РПН найбільш повно реалізовано можливість керованого впливу на структуру турбулентного потоку. Розвинута зона контакту пилогазового потоку з краплями і плівками рідини в апаратах з РПН може бути організована за рахунок введення у робочий об'єм додаткових закріплених або незакріплених насадкових тіл. Регулярне розташування елементів насадки на струні дозволяє організувати вихрові зони із певним встановленим кроком як у поздовжньому так і поперечному перетину, що забезпечує рівномірний розподіл потоків і однорідність газорідного шару.

Внаслідок лабораторних досліджень було запропоновано конструкції апаратів з РПН, що поєднують у собі можливості створення у робочій зоні організованих вихрових зон і мають широкий діапазон стійкої роботи. Для опису гідродинаміки апаратів з РПН було використано лабораторні стенди, що становлять собою прямоочні апарати колонного типу з регулярним розташуванням турбулізуючих елементів, що відповідає принципам поздовжнього секціонування та призначені для очищення газів від дрібнодисперсних зважених речовин.

Одна із дослідних конструкцій ежекційного апарату з РПН (рис. 5.1) становить собою колонний апарат усередині якого між двома опорними

решітками закріплені гнучкі струни на яких зафіксовано елементи насадки (пластини). Під дією газового потоку відбувається коливальний рух струн. Це забезпечує турбулізацію газорідного шару, а повздовжні коливання сприяють збільшенню перемішування потоків. Керований вплив на газовий потік здійснюється за рахунок зміни геометричних форм, розмірів і кроком розташування турбулізуючих елементів на струнах. Кріплення струн до опорних решіток може бути жорстким і консольним.

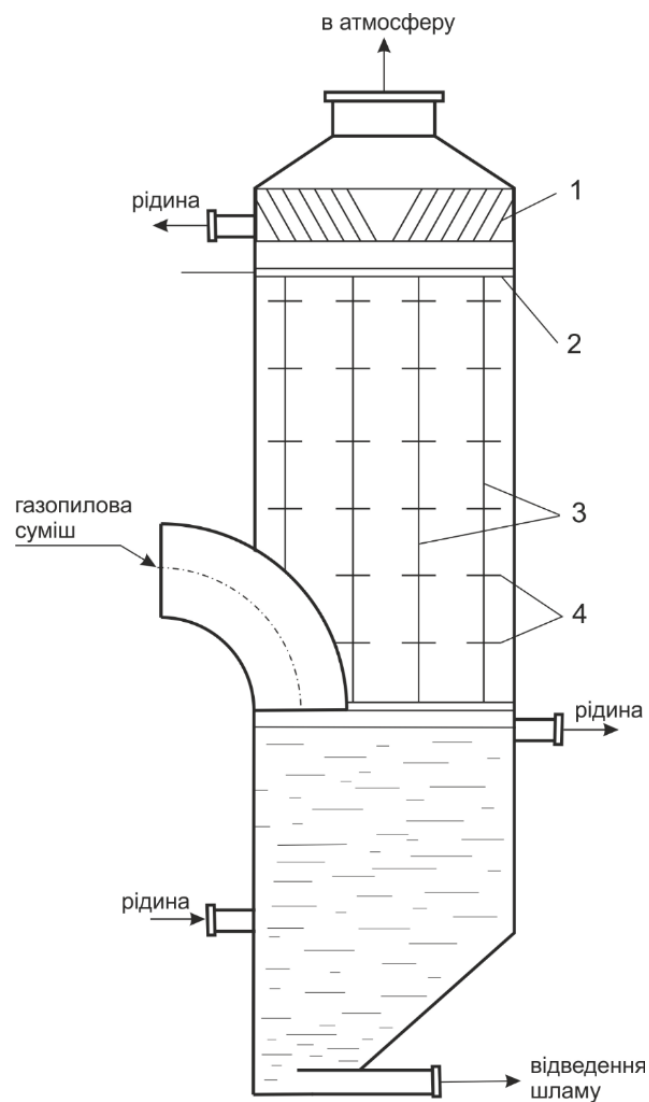


Рисунок 5.1 – Схема досліджуваного прямоточного апарату ежекційного типу з регулярним розташуванням турбулізуючих елементів:

1 – відцентровий краплевловлювач; 2 – фіксуєча решітка; 3 – струни;

4 – пластини

Відсутність форсунок для зрошення, великий вільний перетин опорних решіток ( $S_o \geq 0,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ), великий вільний об'єм апарату ( $\mathcal{E}_o = 0,9\text{--}0,98 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) і коливання насадки дозволяють використовувати апарат для очищення сильно забруднених газових потоків, які містять дрібнодисперсні зважені або смолисті речовини, а також необхідності отримання висококонцентрованих розчинів. Такі конструктивні рішення становлять важливе значення для низки технологічних схем підприємств хімічної галузі (особливо мінеральних добрив) і дозволяють суттєво розширити напрями використання мокрих пиловловлювачів.

Дослідні апарати з РПН обладнанні конічним відцентровим вихроутворювачем, який забезпечує високу ефективність відокремлення рідини від газового потоку у широкому діапазоні навантажень за рідиною і газом.

З метою очищення великих об'ємів газу, до 200 тис.  $\text{м}^3/\text{год}$ , зі значною зміною продуктивності і невисокими концентраціями зважених речовин у зрошувальній рідині також розроблено конструкція форсункового апарата з РПН (рис. 5.2). Парорідинна суміш подається за схемою висхідного прямогоку через отвори циліндричних труб у нижній частині апарату.

Контактна зона апарату складається із двох послідовно з'єднаних зон обробки газів.

У першій зоні відбувається укрупнення зважених у газовому потоці аерозольних частинок за рахунок конденсаційно-коагуляційного механізму осадження. Зона складається з пакета плоскопаралельних каналів з рівномірно розташованими в них турбулізуючими елементами, виконаними у вигляді порожнистих циліндрів. Циліндри в нижній частині мають перфорацію і одночасно виконують функцію парових каналів (подається парорідинна суміш). Провальна тарілка, яка розділяє зони апарату, має діаметр отворів  $d_o = 20 \text{ мм}$  і вільний переріз полотна тарілки 45%, що створює рівномірний пилогазорідинний потік у другій зоні апарату.

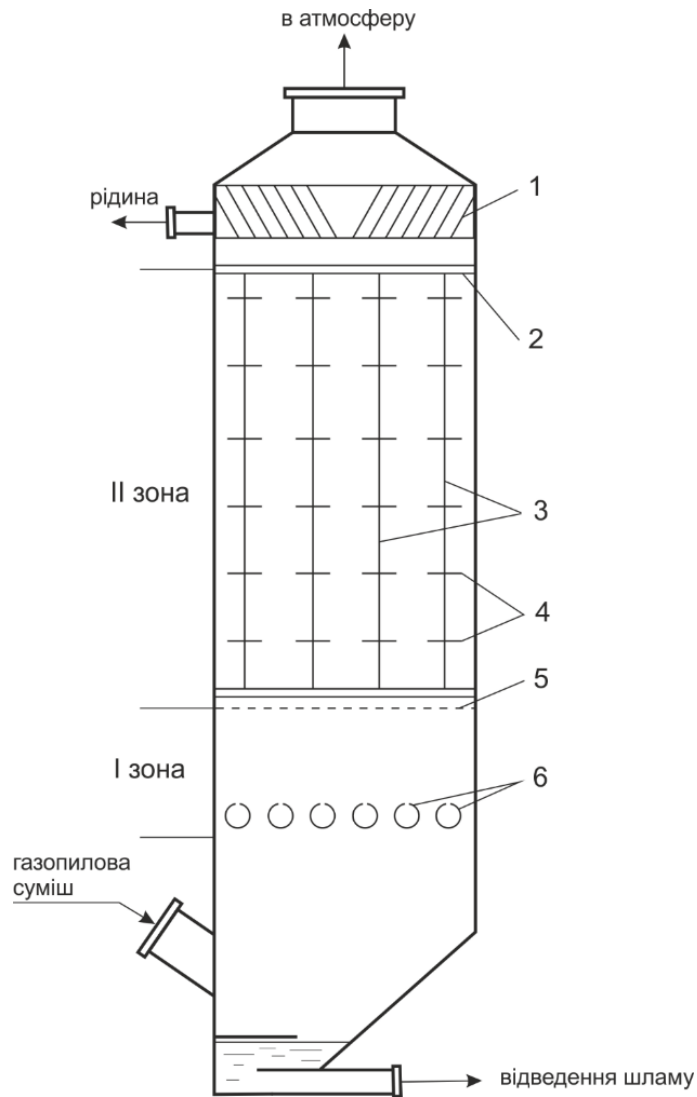


Рисунок 5.2 – Схема досліджуваного прямоточного апарату форсункового типу з регулярним розташуванням турбулізуючих елементів:

- 1 – відцентровий краплеловлювач; 2 – фіксуюча решітка; 3 – струни;  
4 – пластини; 5 – розподільча решітка (провальна тарілка); 6 – циліндри з форсунками для введення парорідинної суміші

Друга зона, що призначена для уловлювання дрібнодисперсних зважених речовин, є шаром насадки у вигляді регулярно розташованих по перерізу струн з рівномірно закріпленими на них пластинами. У поздовжньому перерізі пластини на струні можуть мати шахове або коридорне розташування (в останньому випадку вони утворюють «гіпотетичну» тарілку).

Для проведення досліджень було створено установки з вищезазначеними типами апаратів з РПН розміром 1500x400x300 мм. У якості насадкових елементів використовувались пластини квадратної форми 30x30, 50x50, 80x80 мм і круглої форми діаметром  $\varnothing$  30, 50, 80 мм (рис. 5.3).

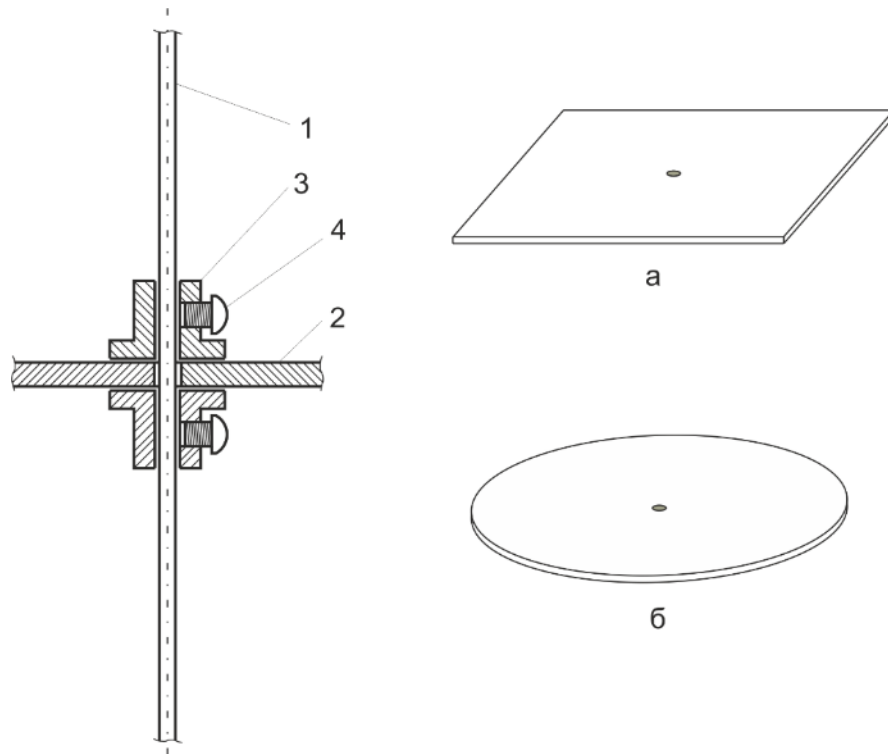


Рисунок 5.3 – Схема кріплення насадки (пластин) на струнах у контактній зоні апаратів з РПН: 1 – струна; 2 – пластина; 3 – фіксуючі опори; 4 – гвинт-фіксатор; а – квадратна пластина; б – кругла пластина

Вимірювання товщини плівки і розміру крапель відбувалося з використанням методу лазерного ножа і швидкісної фото-, відеозйомки. Фракційна ефективність апаратів визначалась малогабаритним семиступеневим імпактором із подвоєними ступенями, що був тарований монодисперсним аерозолем.

## 5.2 Гідродинамічні залежності і характеристики апаратів з організованими вихровими зонами

### 5.2.1 Ежекційний апарат з РПН

Аналіз зміни гідравлічного опору апарата від швидкості газу за різних початкових рівнях рідини, а також візуальні спостереження, фото- і відеозйомка дозволяють виділити три гідродинамічних режими: протиточний, перехідний і прямоточний (рис. 5.4).

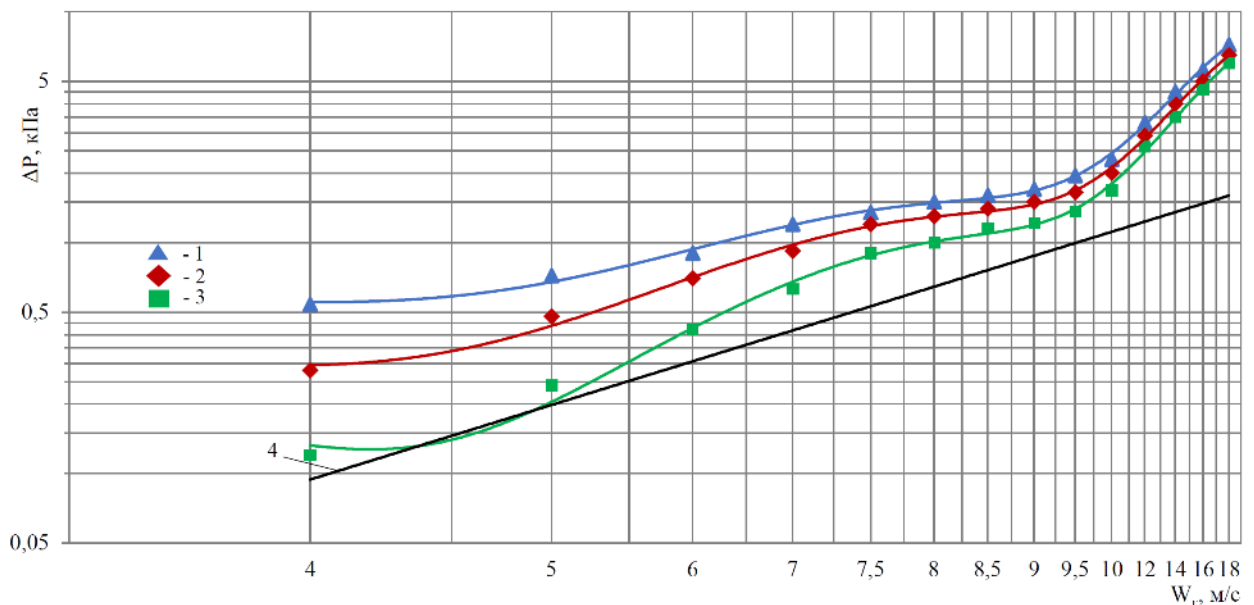


Рисунок 5.4 – Залежність гідравлічного опору ежекційного апарату з РПН від швидкості газу за умови різного початкового рівня рідини:

1 –  $h_o = +0,03$  м; 2 –  $h_o = 0$  м; 3 –  $h_o = -0,03$  м; 4 – без рідини

За режиму протитоку ( $W_e < 7$  м/с) в результаті удару газового потоку під патрубком спостерігається (рис. 5.5) утворення кратера, а відтиснена рідина піднімається у зону ежекції, де у результаті тертя з поверхні «пагорба» відбувається зрив і винесення крапель у контактну зону апарата. Кількість рідини, що намагається відокремитися від поверхні у вигляді струменів, залежить від швидкості газу в зоні ежекції і значною мірою від початкового

рівня рідини. Величина  $h_o$  у цьому режимі визначає як характер зміни  $\Delta P$ , так і структуру газорідного шару. За  $h_o < 0$  вплив  $W_2$  на  $\Delta P$  більший, ніж за умови  $h_o > 0$ , а у розмірах крапель, що відриваються від поверхні рідини, переважають більш тонкодисперсні фракції (0,8–1,2 мм). Останні осаджуються на елементах насадки (пластинах) у контактній зоні апарату, що утворює плівку рідини, яка з часом накопичення стікає з них і руйнується. Краплі, що генеруються елементами насадки, за цього режиму мають більший фракційний розмір (1,4–2,1 мм), швидкість витання яких більша за швидкість газу в перетині апарату. Саме це й призводить до протитечійного руху і випадіння крапель у зону ежекції. Крім того, частина рідини стікає у вигляді плівок стінками апарату і струнах на яких закріплено насадку.

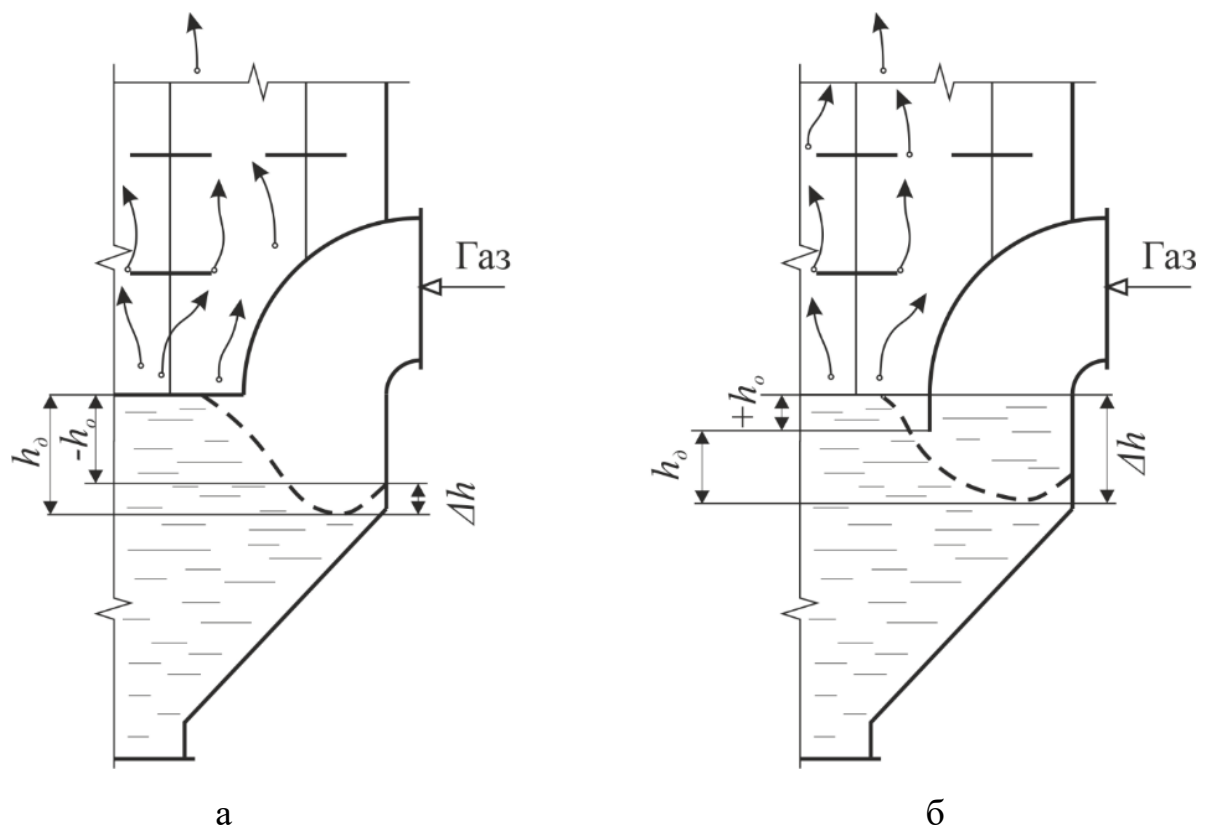


Рисунок 5.5 – Взаємодія фаз в ежекційній зоні: а –  $h_o < 0$ ; б –  $h_o > 0$

За  $h_o > 0$  вплив  $W_2$  на  $\Delta P$ , як вже було зазначено, дещо нижчий, а розмір крапель, що відриваються від поверхні рідини більший ніж 2,5 мм. Очевидно,

що загальна кількість рідини, що знаходиться у контактній зоні, за позитивних значень початкового рівня вище ніж за негативних, що і визначає великі значення гідравлічного опору апарату.

У зв'язку із значним впливом на характеристики і структуру газорідинного шару ежекційної зони розглянемо вплив  $W_e$  і  $h_o$  на її гідравлічний опір (рис. 5.6).

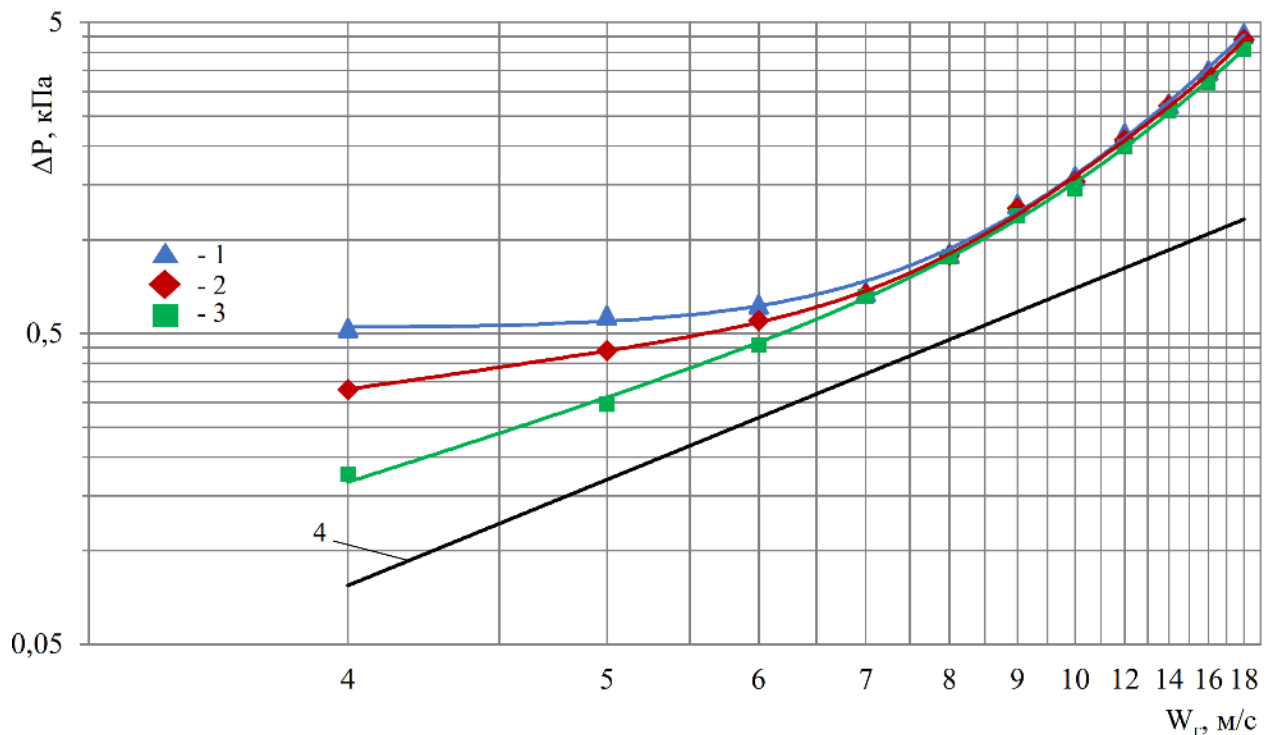


Рисунок 5.6 – Залежність гідравлічного опору зони ежекції від швидкості газу за умови різного початкового рівня рідини: 1 –  $h_o = +0,03$  м; 2 –  $h_o = 0$  м; 3 –  $h_o = -0,03$  м; 4 – без рідини

Коефіцієнт опору сухого апарату у цій зоні визначено як  $\zeta_n = 0,91$ , що відповідає величині коефіцієнта опору для коліна або відвідного патрубку. Наявність рідини в середині апарату призводить до підвищення гідравлічного опору на величину, що визначається коефіцієнтом опору зони ежекції і величиною зміни рівня рідини  $\Delta h$  (рис. 5.5). При цьому, відповідно до рис. 5.4 величина  $\Delta P_e$  за умови швидкості газу в апараті  $W_e > 7$  м/с (швидкість у зоні ежекції  $W_e > 10,5$  м/с) практично мало залежить від значення початкового



рівня рідини в апараті, а визначається переважно  $W_z$ . За  $W_z < 7$  м/с залежність  $\Delta P_e$  від  $h_o$  має складний характер. Для  $h_o < 0$  гідравлічний опір витрачається здебільшого на підйом рідини в зону ежекції і її подрібнення, а за умови  $h_o > 0$  витрати енергії витрачаються переважно на подрібнення плівок рідини на краплі.

Із зазначеного вище випливає, що величина гідравлічного опору зони ежекції визначається кількістю рідини, що витискується у контактну зону  $\Delta h$  і дорівнює

$$\Delta h = h_\delta + h_o, \quad (5.1)$$

де  $h_\delta$  – дійсна відстань рівня рідини (динамічний рівень рідини) від нижнього краю патрубку, м.

Експериментальні дані вказують (рис. 5.7) на те, що значення  $h_\delta$  не залежать від початкового рівня і визначаються швидкісним напором газового потоку, що витікає із патрубка. За зазначеного протиточного режиму і величиною  $h_o > -0,03$  м значення  $h_\delta$  виявляються меншими ніж величина зазору  $h_o$ , що призводить до виходу газового потоку через зазор майже без взаємодії з рідиною, на що указує і характер зміни  $\Delta P_e$ .

Потрібно відмітити, що в режимі протитоку величина  $h_\delta$  більш сильно залежить від  $W_z$  на відміну від режиму прямотоку.

Оскільки, як було зазначено вище, значення динамічного рівня рідини визначається напором газового потоку, для  $h_\delta$  можна записати

$$h_\delta = \zeta_e \frac{W_n^2}{2g}, \quad (5.2)$$

де  $\zeta_e$  – коефіцієнт опору зони ежекції;

$W_n$  – швидкість газового потоку у перерізі патрубка.

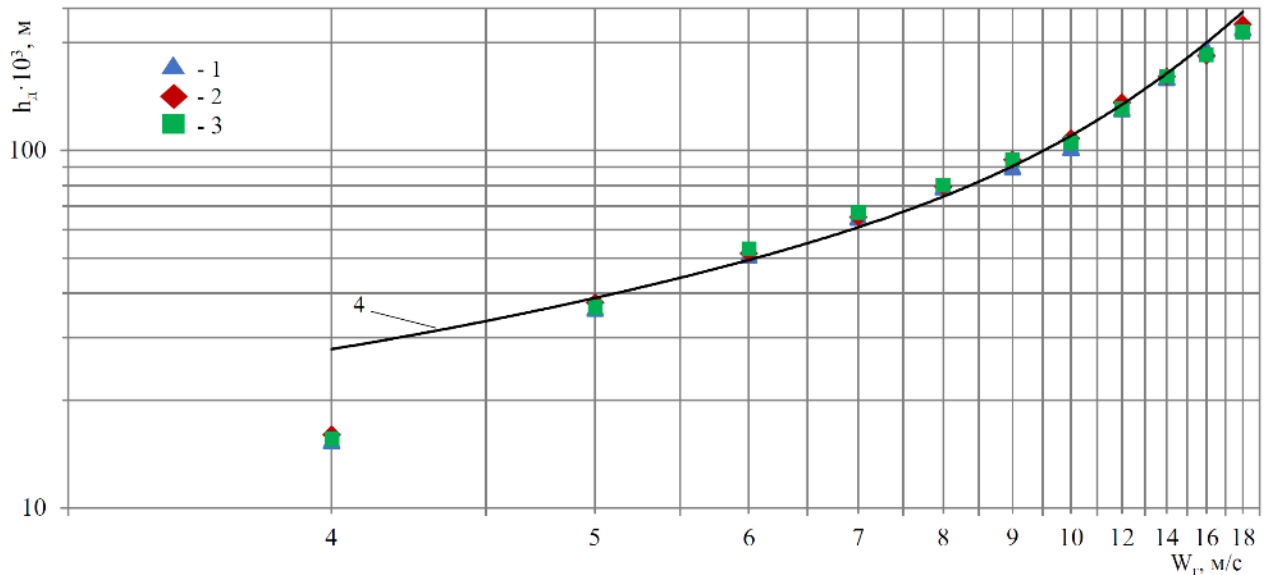


Рисунок 5.7 – Залежність динамічного рівня рідини від швидкості газу за різних початкових рівнях рідини: 1 –  $h_o = +0,03$  м; 2 –  $h_o = 0$  м; 3 –  $h_o = -0,03$  м; 4 – розрахунок за рівнянням (5.2)

У результаті обробки експериментальних даних було отримано значення коефіцієнта опору зони ежекції і яке можна визначити наступною залежністю

$$\zeta_e = \frac{1,215}{Re^{0,55}}, \quad (5.3)$$

де  $Re = \frac{W_n \cdot d_e}{\nu_z}$  – число Рейнольдса;

$d_e$  – еквівалентний діаметр вхідного патрубку, м;

$\nu_z$  – в'язкість газу,  $m^2/s$ .

Результати розрахунків  $h_o$  наведено на рис. 5.7. Відносна похибка рівняння (5.3) у діапазоні  $Re = 3,65 \cdot 10^4 - 40 \cdot 10^6$  ( $W_z = 4-18$  м/с,  $\Gamma = W_n/W_z = 3$ ) не перевищує  $\pm 11,5\%$  і лише для значень менших  $W_z = 4$  м/с сягає  $+34\%$ . Для значень числа Рейнольдса більше ніж  $40 \cdot 10^6$  значення коефіцієнта  $\zeta_e$  буде менше  $8 \cdot 10^{-5}$ .

Перехідний режим  $7 < W_z < 9,5$  м/с буде характеризуватися зниженням залежності перепаду тиску від швидкості газу. Нестійка рівновага між силою

опору середовища і силою тяжіння рідини, що утримується, спричинює коливання і пульсації у шарі регулярної рухомої насадки, а також призводить до коливань рівня рідини у обсязі апарату. Важливо зауважити, що для швидкості  $W_e = 7-8$  м/с практично дуже складно виміряти значення  $h_0$  через значні коливання шару рідини. Під час перехідного режиму по чергово можна спостерігати або висхідний рух рідини угору вздовж контактної зони або ж після накопичення рідини на поверхні насадки зрив плівок рідини, їх подрібнення і провал рідини у зону ежекції. Межі діапазону цього режиму залежать від конструктивних параметрів контактної зони – величини горизонтального і вертикального кроку між елементами насадки, геометричної форми насадки і її розмірів. Кількість утримуваної рідини, особливо на верхній межі режиму несуттєво залежить від початкового рівня рідини в апараті. Наявність перехідного режиму спричинено з елементами насадки, затримкою рідини на їх поверхні із подальшим накопиченням і зривом плівок рідини. Ежекційна зона (рис. 5.6) не має характерних змін у цьому діапазоні швидкостей, тобто швидкості в зоні ежекції  $W_e > 10,5$  м/с достатньо для транспортування рідини газовим потоком.

Режим прямого руху, який починається за  $W_e > 8,5-9,5$  м/с залежно від початкового рівня рідини, характеризується повним транспортом рідкої фази із об'єму апарату у відцентровий краплеловлювач. Пульсації  $\Delta P$  завершуються, а величина динамічного рівня рідини стабілізується. Таким чином, у режимі прямого руху величина швидкісного тиску є достатньою незалежно від величини  $h_0$  для підняття максимально можливої кількості рідини з поверхні «пагорба» рідини, тому гідравлічний опір і визначається переважно витратами на транспортування рідини. Елементи насадки, на яких осаджуються краплини рідини, з часом накопичення рідини, виконують функцію генераторів крапель цілком визначеного розміру. При цьому, на відміну від протиточного режиму, швидкість витання новоутворених крапель рідини нижча за швидкість газу в апараті і вони транспортуються газовим потоком угору, до моменту зіткнення з наступним елементом насадки, де

знову повторюється процес накопичення рідини, зриву і наступного дроблення.

Величина гідравлічного опору ежекційного апарата з РПН, а також межі переходу від одного режиму до іншого визначаються також співвідношенням  $W_n/W_2 = \Gamma$ . За умови, коли  $\Gamma = 3$  і  $h_o = 0$  м, гідравлічний опір зони ежекції сягає  $\Delta P_e = 2640$  Па ( $W_2 = 10$  м/с), при цьому перехід до прямооточного режиму спостерігається за  $W_2 = 6$  м/с. Зменшення співвідношення  $\Gamma = 3$  призводить до зниження  $\Delta P_e$  до 2080 Па ( $W_2 = 10$  м/с) і підвищенню швидкості переходу до режиму прямооточу при  $W_2 = 7,5$  м/с. Подальше зниження співвідношення  $\Gamma = 2$  підвищує швидкість переходу до режиму прямооточу при  $W_2 = 9-9,5$  м/с, однак за таких швидкостей винесення рідини у зону ежекції відбувається менш інтенсивно, погіршується взаємодія фаз газ – рідина. Тому, оптимальним значенням співвідношення  $W_n/W_2$  варто прийняти величину, що дорівнює 3.

Таким чином, аналіз гідродинамічної картини для ежекційного апарата з РПН дозволяє стверджувати щодо можливості високоефективного перебігу процесів пиловловлення і масообміну за розвинутого прямооточного режиму взаємодії фаз, при цьому верхнє значення швидкості пилогазового потоку може бути обмежене величиною не більше 12 м/с, оскільки за  $W_2 > 12$  м/с можна спостерігати значне зростання гідравлічного опору апарата.

### 5.2.2 Форсунковий апарат з РПН

Гідродинаміка подібної конструкції апарату детально розглянута і узагальнено основні принципи функціонування у роботах [322, 326, 353]. Тому, дослідження проводились, в основному, за оптимальних конструктивних параметрів і низької питомої витрати паро- газорідинної суміші (до  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), що відповідає процесам пиловловлення, і об'ємі, необхідному для коректного співставлення з ежекційним варіантом апарата з РПН.

У форсунковому варіанті апарату з РПН також можна чітко виділити три гідродинамічні режими: протиточний, перехідний і прямоточний (рис. 5.8). На відміну від ежекційного варіанту тут більш чітко виражено перехідний режим і в залежності від величини питомого зрошення  $m$  його діапазон коливається в межах від 7,5 до 10,5 м/с. Причина цьому – наявність розподільної решітки – тарілки з великими отворами (вільний перетин складає більше 50%) перед контактною зоною апарату. Накопичення рідини на решітці і відповідно кількості утримуваної рідини у контактній зоні апарату призводить до нестійкого руху фаз. Можна спостерігати почергове провалювання рідини і її накопичення.

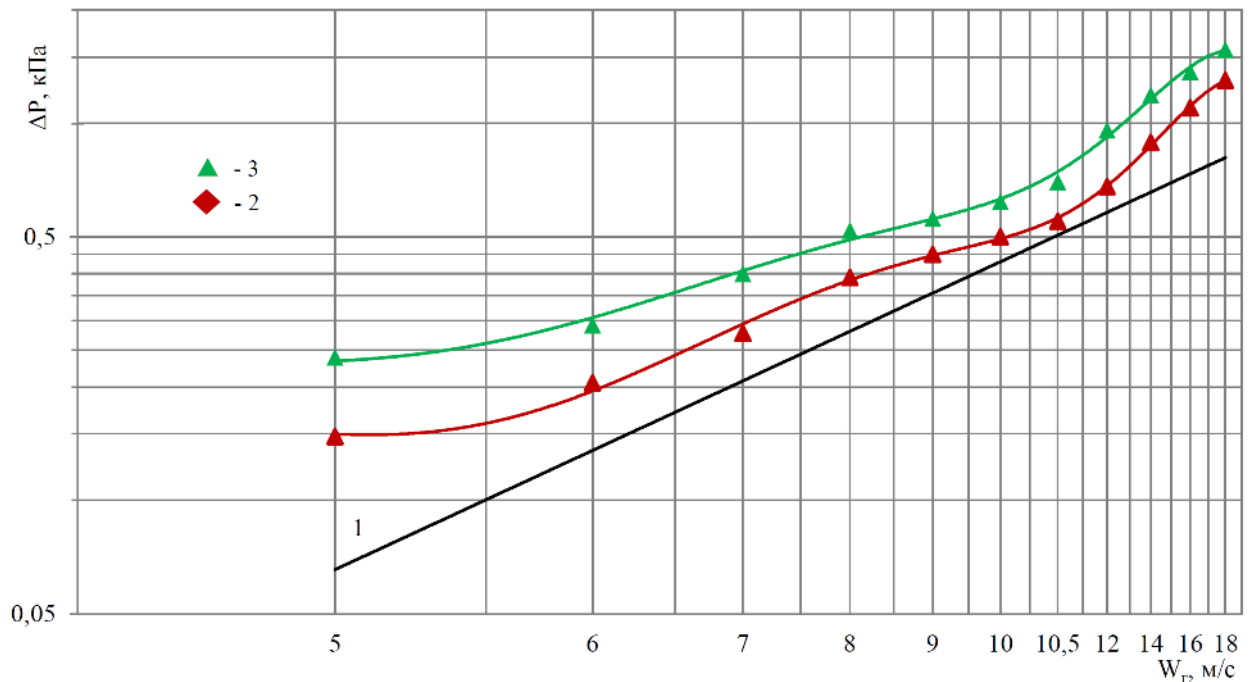


Рисунок 5.8 – Залежність гідравлічного опору форсункового апарату з РПН від швидкості газу за різної щільності зрошення:

$$1 - m = 0 \text{ м}^3/\text{м}^3; 2 - m = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3; 3 - m = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Лабораторні дослідження порівняння величини швидкості переходу від протиточного до перехідного режиму обох конструкцій апаратів дозволяють стверджувати, що швидкість є приблизно рівною і становить 7 – 8,5 м/с.

Гідравлічний опір в прямоточному режимі як і у ежекційному варіанті апарату з РПН змінюється за квадратичним законом. Однак у цілому опір форсункового варіанту апарата в режимі прямотоку у 3,4–3,7 рази нижчий, ніж в ежекційному варіанті. Це можна пояснити значними витратами енергії в ежекційному варіанті на власне ежекцію рідини, а також великою втратою швидкісного тиску в зоні ежекції, оскільки  $W_n = 3 \cdot W_c$ , для форсункового варіанту максимальна швидкість газу у вхідному патрубку  $W_n = W_c$ , а в отворах розподільної решітки –  $W_o \approx 2 \cdot W_c$ .

Робочим режимом для форсункового варіанту апарату з РПН також є прямоточний, що забезпечує інтенсивну взаємодію фаз із дробленням та коагуляцією крапель рідини, тобто постійним оновленням поверхні осадження.

Характер та інтенсивність руху основного несучого газового потоку при прямоточній взаємодії з рідкою фазою, особливо під час спільної течії з парою, визначають загальну картину гідродинамічної обстановки в апараті.

Під час обтікання газорідними потоками дискретно розташованих тіл (пластин) в їх нижній частині відбувається періодичне утворення і зрив вихорів (починаючи з  $Re > 10 - 40$  [321]), які після обтікання тіла утворюють вихровий слід – «вихрову доріжку» Кармана.

Залежно від форми перерізу тіла вихори можуть розташовуватися симетрично або у шаховому порядку.

Рух дрібнодисперсних зважених частинок у газовому потоці після обтікання тіла відбувається з коливаннями та пульсаціями, які характерні для відривної течії несучого (газового) потоку. Крім того, під час руху полідисперсних зважених речовин в зоні одиничного вихору характерно перерозподіл фракцій дрібнодисперсних включень в обсязі вихору. Так, грубодисперсна фракція частинок, що має інерцію, прагне під дією відцентрових сил до периферії вихору, а безінерційна дрібнодисперсна фракція обертається в області осьової зони вихору. Таким чином, вихровий перебіг потоку та його відривний (пульсаційний) характер руху значною

мірою сприяє інтенсифікації процесів укрупнення та осадження частинок забруднюючих речовин.

### 5.3 Розрахунок гідравлічного опору

На підставі експериментальних досліджень двох варіантів апаратів з РПН – ежекційного і форсункового та з урахуванням ідентичності гідродинамічних режимів залежно від швидкості газу, питомого зрошення або вихідного рівня рідини, а також конструктивних параметрів (величина кроку між елементами насадки у вертикальному та горизонтальному напрямках, форми і розмірів турбулізуючих елементів) використовуємо єдиний підхід, що ґрунтується на адитивності опору взаємодіючих фаз. Тоді, гідравлічний опір дорівнює

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_p, \quad (5.4)$$

де  $\Delta P_c$  – гідравлічний опір сухого апарату, Па;

$\Delta P_p$  – гідравлічний опір газорідинного шару, Па.

За аналогією для гідравлічного опору сухого апарата можна записати:

ежекційний варіант

$$\Delta P_c = \Delta P_n + \Delta P_{np}; \quad (5.5)$$

форсунковий варіант

$$\Delta P_c = \Delta P_{pp} + \Delta P_n, \quad (5.6)$$

де  $\Delta P_n$ ,  $\Delta P_{pp}$  – відповідно гідравлічний опір вхідного патрубку і розподільної решітки, Па;

$\Delta P_n$  – гідравлічний опір насадки, Па.

Величину  $\Delta P_n$  і  $\Delta P_{pp}$  зазвичай розраховують за формулами

$$\Delta P_n = \zeta_n \frac{\rho_z \cdot W_n^2}{2}; \quad (5.7)$$

$$\Delta P_{pp} = \zeta_{pp} \frac{\rho_z \cdot W_z^2}{2 \cdot S_o^2}, \quad (5.8)$$

де  $\zeta_n$ ,  $\zeta_{pp}$  – коефіцієнти місцевого опору відповідно патрубку і розподільчої решітки;

$S_o$  – вільний перетин розподільчої решітки, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;

$W_n$ ,  $W_z$  – відповідно швидкість газу у вхідному патрубку і вільному перерізі апарату, м/с.

Коефіцієнт  $\zeta_n$  залежить від кута підведення вхідного патрубку і радіусу загину, зокрема для стандартного коліна патрубку (90°)  $\zeta_n = 1,1$ . Для досліджуваної моделі (рис. 5.1)  $\zeta_n = 0,91$ .

Для розрахунку  $\zeta_{pp}$  за умови, що  $0,3 \leq S_o \leq 0,7$  м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> для провальної тарілки використаємо рівняння

$$\zeta_{pp} = 0,54 - 0,23 \cdot S_o. \quad (5.9)$$

Оскільки кожний елемент насадки становить собою перешкоду, під час обтікання якої відбувається втрата енергії, величина цих втрат енергії залежить також і від умов взаємодії сусідніх вихорів, для гідравлічного опору насадки отримаємо

$$\Delta P_n = \zeta_n \cdot \frac{H_{кз}}{t_6} \cdot \frac{\rho_z \cdot W_z^2}{2 \cdot \epsilon_n^2}, \quad (5.10)$$

де  $\zeta_n$  – коефіцієнт опору насадки;

$H_{кз}$  – висота контактної зони, м;



$t_g$  – крок між елементами насадки за вертикаллю, м;

$\varepsilon_n$  – порозність насадки у ряду, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

Порозність насадки у вигляді пластин дорівнює

$$\varepsilon_n = 1 - \left( \frac{b}{t_g} \right)^2, \quad (5.11)$$

де  $b$  – ширина (діаметр) пластини, м;

$t_g$  – крок між елементами насадки за горизонталлю, м.

Для коефіцієнта гідравлічного опору насадки на підставі оброблення експериментальних даних отримали рівняння

$$\zeta_n = 0,26 \cdot \theta_b \cdot \theta_g \cdot \exp\left(0,121 \frac{t_g}{b}\right), \quad (5.12)$$

де  $\theta_b$ ,  $\theta_g$  – коефіцієнти, які характеризують ступінь взаємодії вихорів у вертикальному і горизонтальному напрямках.

Ступінь взаємодії вихорів у вертикальному напрямі визначається залежно від форми елементів насадки і у нашому випадку для пластини становить

$$\theta_b = 0,85 + 0,15 \sin \left[ \frac{\pi}{2} \left( 4 \frac{t_g}{b} \cdot \frac{Sl}{0,3} + 1 \right) \right], \quad (5.13)$$

де  $Sl$  – число Струхаля, для пластини  $Sl = 0,15$ .

Ступінь взаємодії вихорів у горизонтальному перерізі

$$\theta_g = \frac{\varepsilon_{кр}}{\varepsilon_n}, \quad (5.14)$$

де  $\varepsilon_{кр}$  – критичне значення порозності насадки за якого припиняється взаємний вплив елементів. Для пластини ця величина розраховується за умови, що  $t_2 = 2 \cdot v$ .

З урахуванням вищенаведених положень і закономірностей, підставивши значення  $\zeta_n$ ,  $\zeta_n$ ,  $\zeta_{pp}$  (5.9, 5.12) у рівняння 5.7 та 5.8 та враховуючи певні перетворення отримаємо:

ежекційний варіант

$$\Delta P_c = \left( \zeta_n + \zeta_n \cdot \frac{1}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{1}{\Gamma^2} \cdot \frac{H_{кз}}{t_6} \right) \frac{\rho_z \cdot W_n^2}{2}; \quad (5.15)$$

форсунковий варіант

$$\Delta P_c = \left( \zeta_{pp} \cdot \frac{1}{S_o^2} + \zeta_n \cdot \frac{1}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{H_{кз}}{t_6} \right) \frac{\rho_z \cdot W_z^2}{2}. \quad (5.16)$$

Похибка рівняння (5.15)  $\pm 4\%$ , рівняння (5.16)  $\pm 5\%$ . Діапазони  $W_z = 4 - 18$  м/с,  $t_6 = (1-5) \cdot v$ ,  $t_2 = (1,5-5) \cdot v$ .

Гідравлічний опір газорідинного шару для ежекційного апарата з РПН буде визначатися втратами тиску на тертя газу поверхнею рідини, витратами тиску на зміну рівня рідини від  $h_o$  до  $h_d$  (див. рис. 5.5), тобто на величину  $\Delta h$  і витратами тиску на затримку рідини на регулярній рухомій насадці

$$\Delta P_p = \zeta_e \cdot \frac{\rho_z \cdot W_n^2}{2} + \rho_p \cdot g \left[ (1 - \varphi_e) \cdot \Delta h + h_p \right], \quad (5.17)$$

де  $\varphi_e$  – газовміст у зоні ежекції,  $m^2/m^2$ ;

$h_p$  – кількість рідини, що утримується.

Для розрахунку  $\varphi_e$  скористаємось рівнянням, яке було отримане на основі теоретичного аналізу рівняння енергетичного балансу [383]

$$\varphi_e = 1 - \frac{1}{1 + \sqrt{Fr}}, \quad (5.18)$$

де  $Fr = \frac{W_n^2}{g \cdot \Delta h} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p}$  – модифіковане число Фруда.

Для форсункового апарату з РПН гідравлічний опір газорідинного шару дорівнює

$$\Delta P_p = \rho_p \cdot g \cdot h_p. \quad (5.19)$$

Після обробки експериментальних даних величина  $h_p$  визначається за наступними рівняннями

ежекційний апарат з РПН

$$h_p = K \cdot m^{2/3} \cdot \frac{W_z^2}{2 \cdot g \cdot \varepsilon_n^2}, \quad (5.20)$$

де  $K = \exp(-0,011 \cdot W_z) - \exp(-0,15 \cdot W_z)$  – коефіцієнт;

$m$  – питоме зрошення м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

форсунковий апарат з РПН

$$h_p = K \cdot m^{2/3} \cdot \frac{W_z^2}{2 \cdot g \cdot \varepsilon_n^2}, \quad (5.21)$$

де  $K = \exp(-0,1 \cdot W_z)$  – коефіцієнт.

Загальне рівняння для розрахунку гідравлічного опору має наступний вигляд:

ежекційний апарат з РПН

$$\Delta P = \left( \zeta_n + \zeta_n \cdot \frac{1}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{1}{\Gamma^2} \cdot \frac{H_{\kappa 3}}{t_g} + \zeta_e \right) \frac{\rho_z \cdot W_n^2}{2} + \rho_p \cdot g \left[ (1 - \varphi_o) \Delta h + h_p \right]; \quad (5.22)$$

форсунковий апарат з РПН

$$\Delta P = \left( \zeta_{pp} \cdot \frac{1}{S_o^2} + \zeta_n \cdot \frac{1}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{H_{\kappa 3}}{t_g} + K \cdot m^{2/3} \cdot \frac{1}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_z} \right) \frac{\rho_z \cdot W_z^2}{2}. \quad (5.23)$$

Похибка рівняння (5.22)  $\pm 10\%$ , рівняння (5.23)  $\pm 11\%$ . Діапазони  $W_z = 4 - 18$  м/с,  $h_o = \pm 0,03$  м,  $m = (0,5-1,5) \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Для зручності розрахунку гідродинамічних параметрів апаратів з РПН розроблено програмні алгоритми з використанням алгоритмічної мови С++ та у середовищі MS Office Excel.

#### 5.4 Пиловловлення в апараті з РПН

В апаратах з регулярною пульсаційною насадкою реалізуються два механізми пилоосадження – турбулентно-інерційний і турбулентно-дифузійний – у залежності від густини і розміру частинок. Дрібні частинки, які характеризуються високим ступенем захоплення, осідають на поверхню рідини під впливом турбулентно-дифузійного механізму. Більші частинки, які мають велику інерційність, осідають на краплях рідини під впливом турбулентно-інерційного механізму, обумовленого різною швидкістю руху частинок і крапель у газовому потоці.

В нижній частині апарата з РПН (І зона) можливе введення парорідинної суміші (форсунковий тип апарату з РПН), яка сприяє турбулентно-інерційному механізму пиловловлення за рахунок укрупнення дрібнодисперсних включень газового потоку (конденсація, коагуляція). ІІ зона апаратів з РПН, як ежекційного так і форсункового типу сприяє підвищенню

турбулентно-дифузійного механізму осадження часток за рахунок розвинутої турбулентної поверхні контакту фаз (утворення вихорів на контактних елементах насадки), що у свою чергу збільшує ефективність пиловловлення.

Ефект захоплення стає значним при осіданні частинок на сферах крапель рідини дуже маленького діаметра. При введенні крапель води в потік газу ефективність захоплення зростає зі зменшенням розміру краплі і досягає великих значень й для дуже дрібних частинок. Це пояснюється тим, що при такому способі пиловловлення створюються відносно великі швидкості твердих частинок і крапель рідини. Ефективність пиловловлення підвищується зі збільшенням кількості рідини, яка знаходиться в робочому об'ємі апарата у вигляді крапель, відносної швидкості газового потоку, розміру частинок і зі зменшенням діаметра краплі.

Для підтвердження ефективності використання досліджуваних конструкцій апаратів з РПН були проведені експериментальні дослідження на лабораторному стенді на базі лабораторії кафедри прикладної екології Сумського державного університету.

В дослідний стенд подавали пилогазовий потік на очищення, який містив у якості дрібнодисперсних пилових включень розпилений  $TiO_2$  з початковою концентрацією  $3 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>. Для забору проби запиленого повітря на виході з апарату необхідно було визначити швидкість виходу пилогазового потоку. Результати визначення параметрів газопилового потоку для відбору проб пилу на виході з апарату наведено в Додатку Г.

Результати проведеного дослідження ефективності пиловловлення для ежекційної конструкції апарату з РПН наведено в табл. 5.1 та рис. 5.9.

Ефективність пиловловлення ежекційного типу апарату з РПН проводили за швидкості пилогазового потоку 7 – 13 м/с, висоти початкового рівня рідини в зоні ежекції -0,03 – +0,03 м.

Аналіз рис. 5.9 дозволяє стверджувати, що збільшення ефективності роботи апарата при швидкості газу в ежекційному апараті РПН з 7 до 10 м/с, пояснюється виходом з перехідного в робочий (прямоточний) режим роботи.

Таблиця 5.1 – Дослідження ефективності пиловловлення ежекційного апарату з регулярною пульсаційною насадкою

№ з/п	Висота початкового рівня рідини, $\Delta h$ , м	Швидкість газу в апараті, м/с	Середня масова концентрація пилу на вході, $10^{-6}$ кг/м <sup>3</sup>	Середня масова концентрація пилу на вході, $10^{-6}$ кг/м <sup>3</sup>	Ступінь очищення, %
1	-0,03	7	3	0,231	92,3
2	-0,03	10	3	0,045	98,5
3	-0,03	13	3	0,069	98,2
4	0,0	7	3	0,171	94,3
5	0,0	10	3	0,024	99,2
6	0,0	13	3	0,057	98,6
7	+0,03	7	3	0,156	94,8
8	+0,03	10	3	0,012	99,6
9	+0,03	13	3	0,048	98,8

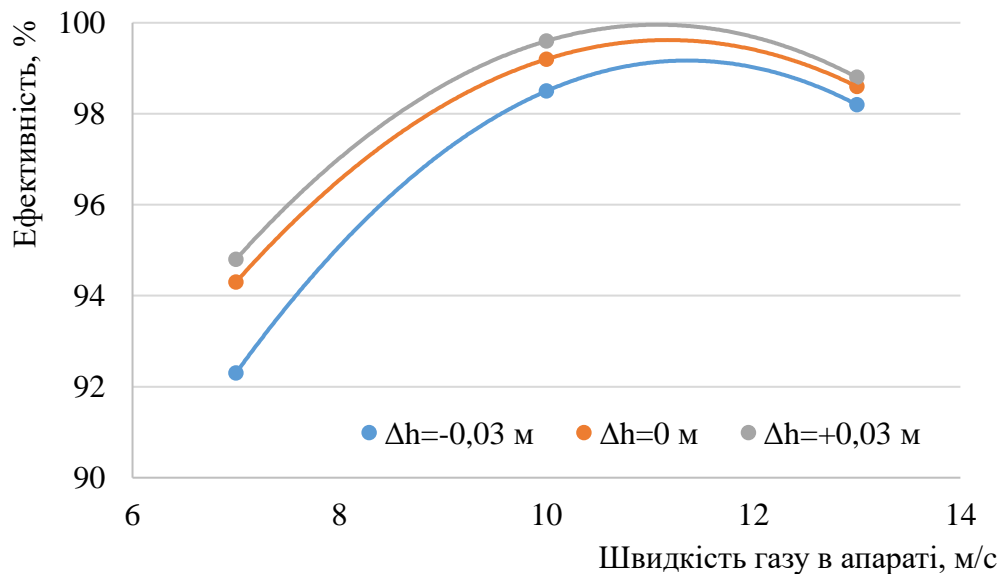


Рисунок 5.9 – Залежність ефективності пиловловлення в ежекційному апараті з РНП від швидкості газу при різних значеннях рівня рідини

Робочий режим пиловловлення характеризується розвинутим турбулентним газорідинним шаром, інтенсивним процесом вихроутворення в зоні пульсаційної насадки. Подальше збільшення швидкості газу посилює

вихровий режим в апараті і призводить до проскоку більшої кількості крапель рідини та зростанні енергетичних затрат – гідравлічного опору. Максимальна ефективність пиловловлення дрібнодисперсного пилю в досліджуваному ежекційному апараті з РПН становить 99,6% при швидкостях газу 10 м/с та висоти початкового рівня рідини в зоні ежекції +0,03 м. Варто зазначити, що навіть під час перехідного режиму до прямогоку ефективність роботи ежекційного апарату з РПН складає не менше 90%.

Результати проведеного дослідження ефективності пиловловлення для форсункової конструкції апарату з РПН наведено в табл. 5.2 та на рис. 5.10.

Таблиця 5.2 – Дослідження ефективності пиловловлення форсункового апарату з регулярною пульсаційною насадкою

№ з/п	Щільність зрошення, $m, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$	Швидкість газу в апараті, м/с	Середня масова концентрація пилю на вході, $10^{-6} \text{ кг}/\text{м}^3$	Середня масова концентрація пилю на вході, $10^{-6} \text{ кг}/\text{м}^3$	Ступінь очищення, %
1	0,5	7	3	0,186	93,8
2	0,5	10	3	0,117	96,1
3	0,5	12	3	0,063	97,9
4	0,5	14	3	0,075	97,5
5	1,0	7	3	0,114	96,2
6	1,0	10	3	0,057	98,1
7	1,0	12	3	0,021	99,3
8	1,0	14	3	0,027	99,1
9	1,5	7	3	0,084	97,2
10	1,5	10	3	0,039	98,7
11	1,5	12	3	0,018	99,4
12	1,5	14	3	0,024	99,2

Ефективність пиловловлення форсункового типу апарату з РПН проводили за швидкості пилогазового потоку 7 – 14 м/с та щільності зрошення парорідинною сумішшю  $0,5 - 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

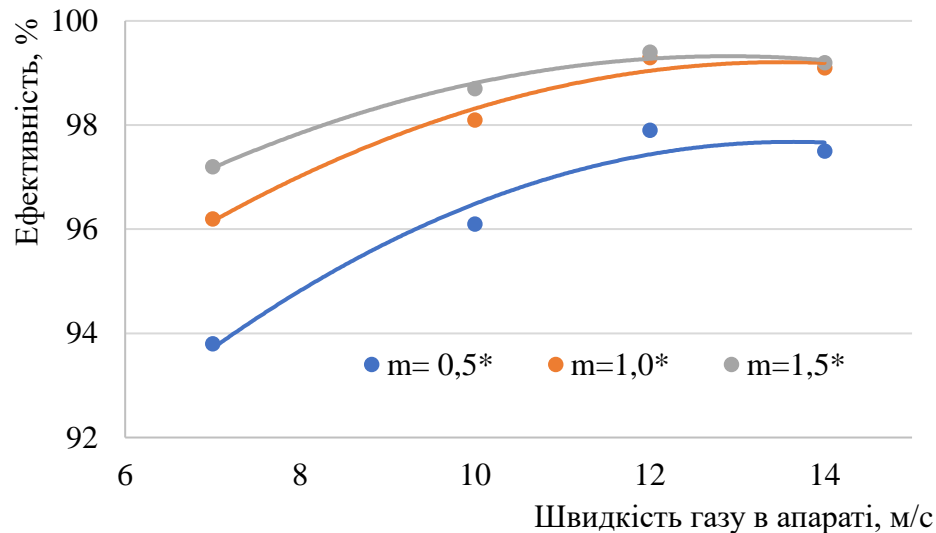


Рисунок 5.10 – Залежність ефективності пиловловлення в форсунковому апараті з РНП від швидкості газу при різних значеннях щільності зрошення  $m$  ( $\cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ )

Аналіз рис. 5.10 дозволяє стверджувати, що збільшення ефективності роботи апарата при швидкості газу в форсунковому апараті РНП з 7 до 12 м/с, пояснюється виходом з перехідного в робочий (прямоточний) режим роботи. Робочий режим пиловловлення характеризується розвинутою турбулентною поверхнею контакту фаз, утвореною взаємодією парорідинної суміші з пилогазовим потоком в I зоні апарата та інтенсивним процесом вихроутворення в II зоні пульсаційної насадки.

Подальше збільшення швидкості газу посилює вихровий режим в апараті і призводить до проскоку крапель рідини і зростанні гідравлічного опору. Максимальна ефективність пиловловлення дрібнодисперсного пилу в досліджуваному форсунковому апараті з РНП становить 99,4% при швидкостях газу 12 м/с та щільності зрошення  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Мінімальна ефективність роботи апарату в перехідному режимі становила не менше 90%, що є схожим результатом ежекційного дослідного апарату. Парорідинна суміш при взаємодії з пилогазовим потоком в апараті з РНП форсункового типу сприяє реалізації більшої кількості складних механізмів уловлення



дрібнодисперсних зважених речовин, що сприяє підвищенню рівня очищення викидів.

За ефективністю роботи апарати з РПН не поступаються іншим конструкціям високоефективного пилогазоочисного обладнання, мають низьку матеріаломісткість, невелику витрату енергії та матеріалів для очищення викидів, що зменшує капітальні та експлуатаційні витрати на їх роботу.

### 5.5 Закономірності конденсаційного та коагуляційного механізму укрупнення аерозольних часток в апараті з РПН

Розглянемо процес укрупнення частинок полідисперсного аерозолю в турбулентному парогазовому потоці (перша зона апарату). Газодисперсний потік, що обтікає циліндр, змішується з парою і потрапляє до об'єму уявної комірки. Укрупнення аерозольних частинок в об'ємі комірки відбувається за рахунок механізму конденсаційного зростання, а також турбулентної і броунівської коагуляції. Припустимо, що вплив градієнтної коагуляції і стефанівського потоку на процес укрупнення незначний, тоді ними можна знехтувати.

Конденсація пари в комірці відбувається на поверхні стінок каналу, на частинках, а також може викликати утворення нових зародків аерозольних частинок.

Загальний баланс за парою виглядає як

$$G_{\text{п}}^{(\text{к})} = G_{\text{п}}^{(\text{п})} - \sum_{i=1}^n g_i, \quad (5.24)$$

де  $G_{\text{п}}^{(\text{п})}$  – початкова кількість пари, а її кількість на конденсацію дорівнює

$$\sum_{i=1}^n g_i = g_1 + g_2 + g_3, \quad (5.25)$$

тут  $g_1$  – кількість пари, що конденсується на поверхні каналу;

$g_2$  – кількість пари, що конденсується на поверхні частинок аерозолі;

$g_3$  – кількість сконденсованої пари в об'ємі комірки з утворенням зародків.

За певних умов, тобто при значеннях перенасичення пари  $S < S_{кр}$ , в парогазовій системі утворення зародків припиняється [339], тоді основною складовою процесу конденсації буде конденсація на поверхні каналу і на частинках аерозолі.

Для визначення кількості сконденсованої пари на поверхні каналу можна скористатися рівнянням масоперенесення

$$\frac{dg_1}{d\tau} = \frac{\beta_{\text{п}} F}{R_{\text{г}} T_{\text{пр}}} [P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}], \quad (5.26)$$

де  $F$  – поверхня конденсації, м<sup>2</sup>;

$P_{\text{ст}}$  – парціальний тиск пари біля стінки, Па;

$R_{\text{г}}$  – універсальна газова стала;

$\beta_{\text{п}}$  – коефіцієнт масовіддачі пари, м/с;

$\tau$  – час, с;

$T_{\text{пр}}$  – температура парогазової суміші, К;

$P_{\text{п}}$  – парціальний тиск пари, Па.

Кількість сконденсованої пари на частинках можна представити як

$$\frac{dg_2}{d\tau} = N_{\text{ч}} \int_0^{\infty} \frac{dg_r}{d\tau} f(r, \tau) d_r, \quad (5.27)$$

де  $dg_r/d\tau$  – кількість пари, що конденсується на одиничній частинці;

$f(r, \tau)$  – функція розподілу аерозольних частинок за розмірами;

$N_r$  – загальна кількість частинок, що приймають участь в процесі укрупнення.

Початкова функція розподілу частинок аерозолю за розмірами, яка підкорюється нормально-логарифмічному розподілу [99], в початковий період часу конденсації може бути записана у вигляді

$$f(r, 0) = -\frac{1}{r \ln \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln \bar{r})^2}{2 \ln^2 \sigma}\right]. \quad (5.28)$$

Тут  $\bar{r}$  – середній геометричний радіус частинок, м;  $\sigma$  – стандартне геометричне відхилення.

Зміна маси одиничної частинки, згідно [384] має вигляд

$$\frac{dg_r}{d\tau} = \frac{4\pi\beta_{\text{II}}M_{\text{II}}r}{R_r T_{\text{III}} \varphi} [P_{\text{II}} - P_r(T_r)], \quad (5.29)$$

де  $M_{\text{II}}$  – молекулярна маса пари;  $\varphi = 1 + (1,33\text{Kn} + 0,71)/(1 + \text{Kn})$ ;

$\text{Kn}$  – число Кнудсена;

$\rho_r$  – щільність газу,  $\text{кг/м}^3$ .

Для зміни радіусу частинки з часом рівняння (5.29) набуває наступного вигляду

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{3\beta_{\text{II}}M_{\text{II}}}{rR_r T_{\text{III}} \varphi \rho_r} [P_{\text{II}} - P_r(T_r)]. \quad (5.30)$$

Температура і тиск парогазової суміші визначимо виходячи із балансу змішування:

$$T = \frac{T_{\Gamma} + abT_{\Pi}}{1 + ab}. \quad (5.31)$$

$$P = \frac{P_{\Gamma} + acP_{\Pi}}{1 + ac}. \quad (5.32)$$

Тут  $a = G_{\Pi}/G_{\Gamma}$ ,  $b = C_{\Pi}/C_{\Gamma}$ ,  $c = M_{\Pi}/M_{\Gamma}$ ,  $C_{\Pi}$ ,  $C_{\Gamma}$  – теплоємності пара і газу відповідно, Дж/кг·К.

Розв'язок рівняння (5.29) або (5.30) сумісно з рівняннями (5.31) та (5.32) є справедливим у випадку рівномірного розподілу температур і тисків в об'ємі комірки, тобто застосовується головним чином для ламінарного режиму течії парогазової суміші. Але у нашому випадку для течії парогазової суміші характерна інтенсивна турбулізація, що викликає суттєві перепади (флуктуації) тисків і температур парогазового потоку за перетином і об'ємом руху.

Під час переходу до розгляду руху потоку в одиночному вихорі з позицій теоретичної гідродинаміки [385], припустимо, що вихор складається із ядра вихору і поля вихору, які обертаються за законом твердого тіла (рис. 5.11).

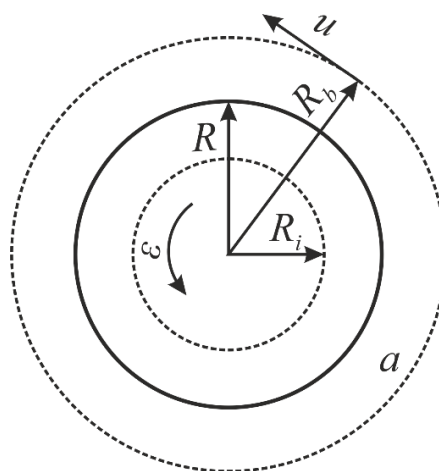


Рисунок 5.11 – Схематичне зображення ядра і поля вихору

Тоді для вимірювання лінійної швидкості руху від радіусу вихору можна записати для ядра вихору ( $R_i < R$ )

$$\int_S u_i dS^{(a)} = \omega \pi R_i^2, \quad (5.33)$$

для поля вихору ( $R_b > R$ )

$$\int_S u dS^{(a)} = \omega \pi R^3, \quad (5.34)$$

де  $S$  – площа перетину вихору,  $\text{м}^2$ ;

$\omega$  – кутова швидкість руху,  $\text{с}^{-1}$ .

Так як  $u$  та  $u_i$  сталі на відповідних колах вихору, то отримуємо співвідношення для ядра вихору

$$2\pi R_i u_i = \omega \pi R_i^2, \quad (5.35)$$

для поля вихору

$$2\pi R_b u = \omega \pi R^2. \quad (5.36)$$

Звідси випливає, що для ядра вихору

$$u_i = \frac{\omega R_i}{2}, \quad (5.37)$$

для поля вихору

$$u = \frac{\omega R}{2R_b}. \quad (5.38)$$

Якщо у рівняння (5.37) і (5.38) підставити значення кутової швидкості, що дорівнює

$$\omega = \frac{\Gamma}{\pi R^2}, \quad (5.39)$$

де  $\Gamma = \frac{u_r^2}{2f_b} = \frac{u_r d_y}{2Sh}$  – інтенсивність циркуляції швидкості, м<sup>2</sup>/с;

$f_b$  – частота зриву вихорів, с<sup>-1</sup>;

$Sh$  – число Струхаля, то можна отримати наступні залежності для ядра вихору

$$u_i = \frac{\Gamma R_i}{2\pi R^2}, \quad (5.40)$$

для поля вихору

$$u = \frac{\Gamma}{2\pi R_b}. \quad (5.41)$$

На основі закону зміни лінійної швидкості потоку за радіусом вихору визначимо перепад тисків і температур в ядрі і полі вихору. Закон збереження імпульсу в циліндричних координатах можна записати у вигляді:

$$\rho \frac{u}{R} = \frac{\partial P}{\partial R}. \quad (5.42)$$

Підставимо у рівняння (5.42) значення лінійної швидкості із рівняння (5.40) та (5.41) і проінтегруємо за тиском від  $P_0$  до  $P$ , а також за радіусом вихору від 0 до  $R$ . Отримаємо:

$$P_{\Gamma} = \frac{\Gamma^2 R^2 \rho_{\Gamma}}{8\pi^2 R_b^4} + P_0, \quad (5.43)$$

де  $P_0$  – тиск в центрі вихору;

$P_{\Gamma}$  – тиск газу, Па.

Тоді для поля вихору залежність буде мати вигляд

$$P_R = P_{\Gamma} - \frac{\Gamma^2 \rho_{\Gamma}}{8\pi^2 R_b^2}. \quad (5.44)$$

Для  $P_0$  можна записати вираз

$$P_0 = P_{\Gamma} - \frac{\Gamma^2 \rho_{\Gamma}}{4\pi^2 R_b^2}, \quad (5.45)$$

а для вихору буде записано наступне співвідношення:

$$P_{R^*} = P_{\Gamma} - \frac{\Gamma^2 \rho_{\Gamma}}{4\pi^2 R_b^2} \left( 1 - \frac{R_*^2}{2R_b^2} \right). \quad (5.46)$$

У підсумку для парогозового потоку, що обтікає циліндр з діаметром  $d_u$ , перепад тисків в одиночному вихорі можна записати:

для ядра вихору

$$P_{R^*} = P_{\Gamma} - \rho_{\Gamma} \left( \frac{u_{\Gamma} d_u}{4\pi R_b Sh} \right)^2 \left( 1 - \frac{R_*^2}{2R_b^2} \right). \quad (5.47)$$

для поля вихору

$$P_R = P_r - \frac{\rho_r}{8} \left( \frac{u_r d_u}{4\pi R_b Sh} \right)^2. \quad (5.48)$$

У випадку адіабатичної течії парогазової суміші аналогічний розв'язок спільно з рівнянням адіабати дозволить отримати наступні перепади тисків:

$$\Delta P_{R^*} = \frac{k-1}{k} \rho_r \left( \frac{u_r d_u}{4\pi R_b Sh} \right)^2 \left( 1 - \frac{R_*^2}{2R_b^2} \right), \quad (5.49)$$

$$\Delta P_R = \frac{k-1}{k} \frac{\rho_r}{8} \left( \frac{u_r d_u}{4\pi R_b Sh} \right)^2, \quad (5.50)$$

де  $k$  – показник адіабати.

Для того щоб отримати залежності за змінами температур парогазової суміші в одиночному вихорі розв'яжемо рівняння (5.49) та (5.50) сумісно з рівнянням стану ідеального газу  $PV=R_r T$ . Тоді отримаємо:

для ядра

$$\Delta T_{R^*} = \frac{k-1}{k} \frac{1}{R_r} \left( \frac{u_r d_u}{4\pi R_b Sh} \right)^2 \left( 1 - \frac{R_*^2}{2R_b^2} \right), \quad (5.51)$$

для поля

$$\Delta T_R = \frac{k-1}{k} \frac{1}{2R_r} \left( \frac{u_r d_u}{4\pi R_b Sh} \right)^2. \quad (5.52)$$

В рівняннях (5.26) – (5.29) числове значення радіусу вихору  $R_b$  і ядра вихору  $R^*$  можна визначити за формулами:



$$R_b = 0,25d_u, \quad (5.53)$$

$$R^* = (5,04\nu_r \tau_b)^{1/2}, \quad (5.54)$$

де  $\tau_b$  – час формування вихору, с;

$\nu_r$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с.

Початок утворення кожного вихору, що зривається з циліндру, очевидно, має відношення до вісі циліндра, тоді для часу формування вихору можна записати:

$$\tau_b = 0,5d_u / u_b. \quad (5.55)$$

Тут  $u_b = 0,86u_r$  – швидкість руху вихору, м/с.

За умов широких меж розповсюдження аерозольних частинок за розмірами внаслідок дії відцентрових сил, відбувається фракційний перерозподіл частинок за радіусом вихору. При цьому більш крупні частинки видаляються із зони вихору у суцільний потік, а дрібніші обертаються у вихорі.

Детальний розрахунок структури такого двофазного потоку пов'язаний із значними складнощами, так як необхідно визначити траєкторію частинок як у середині вихорів, так і за їх межами. Однак, у нашому випадку, з певними припущеннями можна обмежитися знаходженням певного критичного радіусу аерозольних частинок  $r_{кр}$ , який буде певною мірою частиною одиниць аерозолю, що обертається у вихорі і залишає його за час, рівний часу формування вихору  $\tau_b$ .

Для опису процесу руху частинок у вихорі можна скористатися рівнянням

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{A} \frac{dx}{dt} - \frac{1}{x^3} = 0, \quad (5.56)$$

де  $x = R/R_b$ ;

$t = \tau u_{ч.м}/R_b$  – безрозмірні величини;

$u_{ч.м}$  – тангенціальна швидкість частинки, м/с;

$$A = \frac{r_ч(\rho_ч - \rho_г)u_{ч.м}}{72\mu_гR_b}.$$

Залежність (5.54) являє собою нелінійне диференційне рівняння, яке не може бути розв'язане у аналітичний спосіб. Однак, якщо знехтувати диференціалом вторинного порядку (через його мізерність), розділити змінні і проінтегрувати за  $t$  від 0 до  $t$  та за  $x$  від  $x_1$  до  $x_2$ , а потім замінити безрозмірні величини, підставити значення  $u_{ч.м} = u_г$ , що розраховується за рівнянням (5.40), отримаємо формулу розрахунку критичного радіусу частинок для ядра вихору:

$$r_{кр} = 70Sh \left[ \left( \frac{\mu_г}{\rho_ч - \rho_г} \right) \left( 1 - \frac{R^2}{R^{*2}} \right) \frac{1}{u_г d_ч} \right]^{1/2} \frac{R^{*3}}{R}. \quad (5.57)$$

Для поля вихору, враховуючи, що  $R_b \gg R^*$  і рівняння (5.41), вираз можна записати у наступному вигляді:

$$r_{кр} = 4,08Sh \left( \frac{\mu_г}{\rho_ч - \rho_г} \right)^{1/2} \left( \frac{d_ч}{u_г} \right)^{1/2}. \quad (5.58)$$

Згідно рівняння (5.54), для нев'язких газів немає необхідності проводити розрахунок збільшення частинок у ядрі вихору, оскільки для таких середовищ  $R_b \gg R^*$  і, як наслідок, вагова частка аерозолу в ядрі мізерно мала. Тоді залежність функції розподілу частинок за розмірами від часу за рахунок конденсації буде мати вигляд:

для суцільного потоку ( $r' > r_{кр}$ )

$$\frac{\partial f(r', \tau)}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial r'} \left[ f(r', \tau) \frac{dr'}{d\tau} \right], \quad (5.59)$$

для вихрового потоку ( $r'' < r_{кр}$ )

$$\frac{\partial f(r'', \tau)}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial r''} \left[ f(r'', \tau) \frac{dr''}{d\tau} \right], \quad (5.60)$$

де  $r'$  та  $r''$  – поточні радіуси частинок у суцільному і вихровому потоці відповідно.

Процес укрупнення аерозольних частинок в об'ємі комірки за рахунок гетерогенної конденсації пари, як зазначалося вище, не є єдиним механізмом, що забезпечує зростання частинок. Наявність турбулентних пульсацій і броунівського (теплого) руху частинок також призводить до їх коагуляційного зростання. З урахуванням цих аргументів рівняння балансу розподілу частинок, що відображує зміну функції розподілу частинок за розмірами в часі, які в подальшому зазнають конденсаційного і коагуляційного зростання, має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(r_u, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial r} \left[ f(r_u, \tau) \frac{dr}{d\tau} \right] = & \int_{r=0}^{r=r_u/\sqrt[3]{2}} K_\kappa \left( \sqrt[3]{r_u^3 - r^3}, r \right) \cdot f \left( \sqrt[3]{r_u^3 - r^3}, \tau \right) \times \\ & f(r, \tau) \cdot \left( \frac{r}{\left( \sqrt[3]{r_u^3 - r^3} \right)} \right)^2 dr - \int_{r=0}^{r=\infty} K_\kappa(r_u, \tau) \cdot f(r_u, \tau) \cdot f(r, \tau) dr + \\ & + \frac{Q}{V_\kappa} [f(r, 0) - f(r, \tau)] \end{aligned}, \quad (5.61)$$

де  $r$  – поточний радіус аерозольної частинки, м;

$Q$  – витрата аерозолі, м<sup>3</sup>/с;

$V_k$  – об'єм комірки, м<sup>3</sup>;

$K_k$  – коефіцієнт коагуляції за рахунок турбулентного та броунівського механізмів, м<sup>3</sup>/с.

Коефіцієнт коагуляції  $K_k$ , що входить до рівняння (5.61), являє собою суму коефіцієнтів турбулентної  $K_T$  і броунівської  $K_\delta$  коагуляцій:

$$K_k = K_T + K_\delta. \quad (5.62)$$

$K_\delta$  можна визначити із співвідношення

$$K_\delta = \frac{4k_\delta T_\Gamma}{3\mu_\Gamma}, \quad (5.63)$$

де  $k_\delta$  – стала Больцмана.

Коефіцієнт турбулентної коагуляції згідно [386] дорівнює:

$$K_T = 1,67(r_q + r)^3 \sqrt{\frac{E}{V_\Gamma}}. \quad (5.64)$$

Дисипацію енергії в об'ємі комірки  $E$  визначимо, як

$$E = \frac{N_b}{V_k \rho_{\text{ш}}}, \quad (5.65)$$

де  $N_b$  – потужність вихору, що утворюється під час обтікання циліндру суцільним потоком.

Потужність вихору визначаємо за рівнянням

$$N_b = C_L \sqrt{\frac{C_L}{C_D}} \rho_{\text{ш}} l_u d_u \frac{u_\Gamma^3}{2}, \quad (5.66)$$

де  $C_L$  – коефіцієнт підйомної сили;

$C_D$  – коефіцієнт опору;

$u_T$  – дійсна швидкість газового потоку, м/с;

$l_{ц}$  – довжина циліндру, м.

Об'єм комірки

$$V_k = bl_{ц}t_{в.ц}, \quad (5.67)$$

де  $b$  – ширина плоскопаралельного каналу, м;

$t_{в.ц}$  – висота комірки, що дорівнює відстані між вісями циліндрів, м.

Підставивши рівняння (5.66) і (5.67) у рівняння (5.65), отримуємо

$$E = \frac{C_{LD}}{2b} \frac{d_{ц}}{t_{в.ц}} u_T^3, \quad (5.68)$$

$$\text{де } C_{LD} = C_L \sqrt{\frac{C_L}{C_D}}.$$

Таким чином використання емпіричних рівнянь дозволяє отримати систему диференціальних та інтегрально-диференціальних рівнянь, які дозволяють описати процес укрупнення аерозольних частинок за рахунок конденсаційного та коагуляційного зростання і, як підсумок, виконувати розрахунок ефективності уловлення туманів та інших аерозолів в високоінтенсивних апаратах з РПН.

## 5.6 Розподіл дисперсної фази в апараті з РПН

Проведені дослідження та теоретичні розрахунки дозволяють запропонувати практичну версію опису надзвичайно складного стохастичного

процесу розподілу рівноважних крапель у прямоточному масообмінному апараті з регулярною рухомою насадкою - у шарі турбулізуючих насадочних елементів при висхідному русі фаз (2-а зона, рис. 5.2).

На підставі проведених досліджень та теоретичних розрахунків, наведених у роботі [387], вважатимемо, що процес розподілу рідини на краплі є абсолютно випадковим по відношенню до гідродинамічних енергій крапель  $E_i$  та всі точки зазначеної енергетичної поверхні рівноймовірні для досліджуваної макросистеми, можна загальну функцію розподілу записати з такими обмеженнями виду

$$\int f^{(N)}(\{E_i\}) \prod_{i=1}^N dE_i = 1. \quad (5.69)$$

$$\int f^{(N)}(\{E_i\}) \left( \sum_{i=1}^N E_i \right) \prod_{i=1}^N dE_i = E_{\Pi}. \quad (5.70)$$

Рівняння (5.69) є умовою нормування, а рівняння (5.70) свідчить про те, що середнє значення повної енергії фіксовано.

Виходячи з принципу максимуму ентропії можна отримати вираз для рівноважної функції розподілу [387], який задовольняє умови рівняння (5.69) та (5.70):

$$\int f^{(N)}(\{E_i\}) = \exp \left\{ -\lambda_1 - \lambda_2 \cdot \sum_{i=1}^N E_i \right\}, \quad (5.71)$$

де  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – множники Лагранжа.

У шарі регулярної рухомої насадки фізичні параметри газового потоку визначаються інтенсивністю турбулентних пульсацій елементарних обсягів газу. Отже, дисперсну фазу можна описати канонічним розподілом  $\exp[-E_{\Pi}/T(E)]$ , де  $E_{\Pi}$  – повна енергія, а  $T(E)$  – температура газу, що є функцією енергії дисипації турбулентних пульсацій.

Повна енергія дисперсної фази  $E_{\Pi}$  є функцією, яка залежить від великої кількості параметрів, тому в першому наближенні доцільно залежність функції  $\exp[-E_{\Pi}/T(E)]$  від певних груп узагальнених координат у вигляді співмножників, кожен із яких залежить від однієї з груп змінних. Якщо однією з таких груп узагальнених координат є набір енергії  $\{E_i\}$ , з канонічного розподілу дисперсної фази можна отримати рівняння (5.71).

На основі рівняння (5.71), можна знайти необхідну функцію розподілу  $f(d_k)$ , а також рівняння для функції  $f(E)$ , що характеризує ймовірність різних значень енергії одиничної краплі:

$$f(E) = B \exp(-CE). \quad (5.72)$$

Константи  $B$  і  $C$  визначаються за умови нормування та співвідношення

$$\int_0^{\infty} f(E) E dE = \bar{E} = \frac{E_{\Pi}}{N}, \quad (5.73)$$

де  $N$  – кількість крапель.

Перетворивши рівняння (5.72), отримаємо

$$f(E) = \frac{1}{E} \exp\left(\frac{-E}{\bar{E}}\right). \quad (5.74)$$

Припустимо, що краплі перебувають у стані гідродинамічної рівноваги з навколишнім газом, тоді енергію можна пов'язати з розміром крапель і перейти до функції їх розподілу по діаметру. Тоді гідродинамічну енергію краплі можна як суму «об'ємної»  $E_v$  та «поверхневої»  $E_s$  частин:

$$E = E_v + E_s \quad (5.75)$$

або

$$E = \frac{\pi}{12} \rho_{жс} (\bar{u}')^2 d_{\kappa}^3 + \sigma \pi d_{\kappa}^3, \quad (5.76)$$

де  $\sigma$  — коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;  $\rho_{жс}, \rho_{г}$  — щільність рідини та газу, відповідно, кг/м<sup>3</sup>.

Пульсаційна швидкість  $u'$  визначається із закону «двох третин» Колмогорова-Обухова:

$$u' = B_{\kappa-o} E^{1/3} l^{1/3}, \quad (5.77)$$

де  $B_{\kappa-o} \approx 1$  — коефіцієнт;  $l$  — масштаб вихорів (пульсацій), що можна порівняти з діаметром рівноважних крапель, тобто  $l \sim d_{\kappa.p}$ .

Енергія, що дисипується в масі одиначної краплі

$$E_{\kappa} = \frac{N_{\kappa} \theta_{\theta}}{V_{\kappa} \rho_{жс}}, \quad (5.78)$$

де  $N_{\kappa}$  — потужність вихору, що утворюється за краплею, Вт;

$$V_{\kappa} = 1/6 \pi d_{\kappa}^3 - \text{об'єм сферичної краплі, м}^3;$$

$\theta_{\theta}$  — коефіцієнт, що характеризує рівень взаємодії вихорів у вертикальному напрямку.

Потужність вихору за сферичною краплею визначається за залежністю

$$N_{\kappa} = \psi_{\kappa} \rho_{г} \frac{\pi d_{\kappa}^2 u_{г}^2}{4 \cdot 2}, \quad (5.79)$$

де  $\psi_{\kappa}$  — коефіцієнт опору краплі.



Розв'язавши рівняння адитивності гідродинамічної енергії (5.76) з використанням рівнянь (5.78) та (5.79) та враховуючи, що масштаб пульсацій  $l \sim d_{к.р}$ , отримаємо залежність

$$E = \pi d_{к}^3 \left( A + \frac{\sigma}{d_{к}} \right), \quad (5.80)$$

де  $A = 0,07 (\psi_{к} \theta_{в} \rho_{г})^{2/3} \rho_{ж}^{1/3} u_{г}^2$ .

Функція розподілу крапель по діаметру пов'язана з функцією розподілу енергії таким співвідношенням:

$$f(d_{к}) = f(E) \frac{dE}{d(d_{к})}. \quad (5.81)$$

Розв'язавши отримане рівняння (5.81) з урахуванням рівнянь (5.80) та (5.74), отримаємо

$$f(d_{к}) = \frac{d_{к}^2 \left( 3d_{к} + \frac{2\sigma}{A} \right)}{\bar{d}_{к}^3 \left( \bar{d}_{к} + \frac{\sigma}{A} \right)} \exp \left[ - \frac{d_{к}^3 \left( d_{к} + \frac{\sigma}{A} \right)}{\bar{d}_{к}^3 \left( \bar{d}_{к} + \frac{\sigma}{A} \right)} \right]. \quad (5.82)$$

Припустимо, що  $d_{к} \gg (\sigma/A)$ , тоді отримаємо рівняння (5.82) наступного виду:

$$f(d_{к}) = 3 \frac{d_{к}^2}{\bar{d}_{к}^3} \exp \left( - \frac{d_{к}^3}{\bar{d}_{к}^3} \right). \quad (5.83)$$

У рівняннях (5.82) та (5.83) параметр  $\bar{d}_\kappa^3$  є невідомим. Щоб перейти до більш зручної величини – середнього діаметру, для  $\bar{d}_\kappa$  отримаємо

$$\bar{d}_\kappa = \frac{3}{\bar{d}_\kappa^3} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{d_\kappa^3}{\bar{d}_\kappa^3}\right) d(d_\kappa). \quad (5.84)$$

Інтеграл у правій частині рівняння (5.84) є інтегралом від показової функції та обчислюється за допомогою гамма-функції. Тоді для середнього діаметра краплі отримаємо

$$\bar{d}_\kappa = (\bar{d}_\kappa^3)^{1/3} \Gamma\left(\frac{4}{3}\right), \quad (5.85)$$

де  $\Gamma$  – гамма-функція.

Визначивши табличне значення гамма-функції, перетворюємо рівняння (5.84):

$$f(d_\kappa) = 2,11 \frac{d_\kappa^2}{\bar{d}_\kappa^3} \exp\left[-0,7 \left(\frac{d_\kappa}{\bar{d}_\kappa}\right)^3\right]. \quad (5.86)$$

Рівняння (5.86) дозволяє за рахунок середнього діаметра краплі знайти вид розподілу крапель за розмірами (рис. 5.12).

Проведені експериментальні дослідження з використанням швидкісної фотозйомки (камера IDT XSS Series) дозволили встановити, що у шарі насадки діють три механізми утворення дисперсної системи.

Встановлено, що плівка рідини на елементі насадки рухається з лобової частини до кромки та руйнування плівкового руху починається безпосередньо на кромці з утворенням струменів рідини.

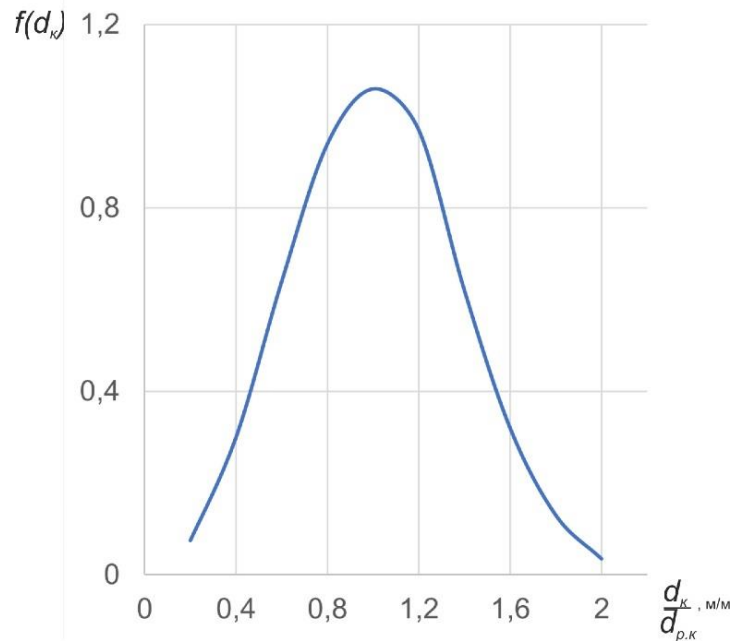


Рисунок 5.12 – Функція розподілу діаметра крапель зрошуючої рідини за розмірами

Причина розпаду плівки - турбулізація, що виникає в результаті накладання коливань при закінченні рідини з кромки пластини. Якщо припустити, що початкова швидкість струменя дорівнює швидкості плівки  $u_{с.н} = u_{пл}$ , то довжина хвилі коливань, які при цьому зростатимуть, визначається за залежністю [326]

$$\lambda_0 = \frac{(3\pi\sigma\zeta_0^2)}{\rho_z u_{пл}^2}. \quad (5.87)$$

Для кількості утворених струменів справедливо рівняння

$$n_c = \frac{\Pi}{\lambda_0} = \frac{(\Pi\rho_z u_{пл}^2)}{3\pi\sigma\zeta_0^2}, \quad (5.88)$$

де  $\Pi$  — периметр зливу, м;

$\zeta_0$  — пористість насадки.

Виходячи з рівності об'ємних витрат рідини, що стікає у вигляді плівки та вигляді струменів, з використанням рівняння (5.88) отримаємо рівняння, яке дозволяє визначити початковий діаметр струменів:

$$d_{c1} = \left( \frac{12\delta_{nl}\sigma\zeta_0^2}{\rho_{\varepsilon}u_{nl}^2} \right)^{1/2}. \quad (5.89)$$

Струменевий режим течії характеризується зменшенням діаметра струменя в міру закінчення за рахунок збільшення  $u_c$ , так як, на відміну від плинущої плівки по поверхні елемента насадки, в даному випадку маємо течію з вільними межами під впливом тільки сил газового потоку і сили тяжіння. Розпад струменя на краплі відбувається за рахунок її турбулізації і через прагнення поверхневої енергії струменя досягти мінімального значення, яке має крапля рідини сферичної форми.

Припускаючи рівність кінетичної та поверхневої енергії для суцільної частини струменя з урахуванням її нерозривності, отримаємо рівняння (5.90), яке дозволяє визначити  $d_{c2}$ :

$$d_{c2} = d_{c1} - \frac{8\sigma}{\rho_{ж}u_{nl}^2 \left( \frac{d_{c1}^4}{d_{c2}^4} - 1 \right)}. \quad (5.90)$$

Проте, аналітичне рішення рівняння (5.90) щодо  $d_{c2}$  неможливе.

Прийнявши значення відносної довжини хвилі коливання, що найбільш швидко зростає, і товщину стрічки, що утворюється в результаті розпаду струменя, за рекомендаціями [388], отримаємо рівняння, яке дозволяє встановити середній діаметр краплі:

$$d_{к.ср} = B_K \left[ \frac{\sigma^{1/3}}{\rho_{\varepsilon}^{1/6} u_c^{2/3} \rho_{ж}^{1/6}} \right], \quad (5.91)$$

де  $B_K$  – корегуючий коефіцієнт.

Краплі, утворені при розпаді струменя, мають здатність до вторинного дроблення та утворення ансамблю крапель з меншим діаметром, стійких (рівноважних) у газовому потоці з існуючим динамічним напором.

Зважаючи на сферичність крапель і виходячи з умови рівності сил, що діють на краплю, отримаємо залежність для визначення рівноважного діаметра крапель:

$$d_{к.р} = 4,9 \left[ \frac{\sigma^{3/5} d_{к.сп}^{2/5}}{\psi_{\kappa}^{2/5} \theta_{\theta}^{2/5} \rho_{\rho}^{2/5} \rho_{\rho ж}^{1/5} u_2^{6/5}} \right]. \quad (5.92)$$

Візуальні спостереження за картиною взаємодії фаз у шарі регулярної рухомої насадки дозволили визначити існування великої кількості крапель з діаметром, значно меншим, ніж діаметр стійких крапель. Утворення таких крапель, ймовірно, відбувається у межфазній прикордонному шарі, тобто саме за рахунок зміни пульсаційних швидкостей із масштабом  $l \sim d_{к.м}$ . Враховуючи, що градієнт швидкості викликає звичайну ньютонівську дотичну напругу

$$\tau_{сп} = \mu \frac{du'}{dy}, \quad (5.93)$$

визначимо залежність для діаметра дрібних крапель:

$$d_{к.м} = 5,2 \left[ \frac{v_2^2 \sigma \delta_{пл}^{4/3} \rho_{\rho ж}^{1/3}}{\psi_{\kappa}^2 \theta_{\theta}^{4/3} \rho^{1/3} u_2^4} \right]. \quad (5.94)$$

Проведене дослідження поверхні контакту фаз дозволило встановити, що визначальну роль відіграє краплинна складова. Це підтверджують і розглянутий вище механізм утворення краплинної структури і візуальні

спостереження гідродинамічної картини на насадковому елементі в момент утворення крапель.

### **5.7 Ефективність уловлення дрібнодисперсних зважених речовин в апараті з РПН**

В апаратах мокрого очищення пилогазових викидів розмір крапель рідини зазвичай знаходиться в діапазоні 0,1-1,0 мм у діаметрі. Частинки пилу розміром менше 0,1 мкм можуть ефективно уловлюватися внаслідок дифузійного механізму осадження (броунівська дифузія). Інерційний механізм та механізм захоплення грають велику роль при очищенні від твердих частинок розміром більше 1 мкм. Отже, існують частинки розміром 0,1-1,0 мкм, для яких ефективність уловлювання має мінімальне значення, яке називається мінімальним ефективним діаметром уловлювання частинок.

Апарати мокрого пиловловлення зазвичай використовуються для видалення частинок пилу розміром більше 1 мкм, однак, проведені дослідження [322, 326, 389], довели, що апарати мокрого пиловловлення (високоєфективні апарати з провальними тарілками великих отворів, з регулярною пульсаційною насадкою) можуть ефективно використовуватися для уловлення частинок розміром менше 1 мкм за оптимальних умов розміру крапель та розвиненої поверхні контакту фаз в апараті.

Ефективність уловлювання твердих частинок в апаратах мокрої очистки розраховується шляхом розгляду картини поведінки одиначної краплі, частки частинок, які були поглинені об'ємом досліджуваної краплі в процесі роботи апарату і подальшого підсумовування всіх крапель в одиниці об'єму газового потоку. Визначити ефективність цієї взаємодії можна шляхом вирішення рівняння Нав'є-Стокса для повітряного потоку навколо краплі рідини. Однак отримати теоретичне рішення рівняння Нав'є-Стокса є важким завданням через складну структуру течії з урахуванням внутрішньої циркуляції крапель. Тому інтерес викликає підхід визначення ефективності взаємодії крапель

рідини та твердих частинок забруднюючої речовини за рахунок обліку різних механізмів осадження частинок в апараті.

Фізико-хімічні параметри дрібнодисперсних зважених речовин та характер перебігу газового потоку, що генерує певні турбулентні потоки та пульсації в апараті, є одними з визначальних факторів, що впливають на ефективність осадження частинок цих речовин.

Рівняння, що описує процес уловлювання дрібнодисперсних зважених речовин в апаратах мокрого очищення, може бути представлена наступним виразом:

$$\frac{\partial n(d_q, t)}{\partial t} = -n(d_q, t) \int_{D_{\kappa \min}}^{D_{\kappa \max}} \beta(d_q, D_{\kappa}) n_{\kappa}(D_{\kappa}) dD_{\kappa}, \quad (5.95)$$

де  $n(d_q, t)$  – функція розподілу дрібнодисперсних зважених речовин за розмірами в обсязі апарату в момент часу  $t$ ;

$d_q$  – діаметр частинок зваженої речовини, м;

$n_{\kappa}(D_{\kappa})$  – функція розподілу крапель поглинаючої рідини за розмірами;

$D_{\kappa}$  – діаметр рівноважних крапель, характерних для певного турбулентного потоку, м;

$\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, м/с.

Механізм утворення крапель розглянутий у роботі [322], де отримано рівняння для розрахунку діаметра крапель поглинаючої рідини, що утворюються при взаємодії парогазорідинного потоку в апаратах мокрого очищення.

Взаємодія крапель поглинаючої рідини та дрібнодисперсних зважених речовин можна уявити рівнянням:

$$\beta(d_q, D_{\kappa}) = \frac{\pi D_{\kappa}^2}{4} U(D_{\kappa}) \eta(d_q, D_{\kappa}), \quad (5.96)$$

де  $U$  – швидкість руху краплі поглинаючої рідини в об'ємі апарату, м/с;

$\eta(d_c, D_k)$  – ефективність взаємодії зважених частинок  $d_c$  з краплями поглинаючої рідини  $D_k$ .

Виходячи з даних роботи [320] для зважених речовин діаметром більш ніж 0,05 мкм загальну ефективність уловлювання частинок в апаратах мокрого пиловловлення можна представити сумою ефективностей уловлювання за рахунок дифузійного механізму, механізму захоплення частинок та інерційного механізму взаємодії:

$$\eta_{tot} = 1 - (1 - \eta_{diff}) \cdot (1 - \eta_{int}) \cdot (1 - \eta_{imp}), \quad (5.97)$$

де  $\eta_{diff}$  – ефективність уловлювання за рахунок дифузійного механізму;

$\eta_{int}$  – ефективність уловлювання за рахунок механізму захоплення частинок крапель рідини;

$\eta_{imp}$  – ефективність уловлювання за рахунок інерційного механізму.

Розберемо складові рівняння (5.97).

Результати, отримані в роботі [390] дають підстави стверджувати про незначність другорядних складових ефективності уловлювання дрібнодисперсних зважених речовин та спростити вираз (5.95), тоді ефективність взаємодії за рахунок дифузії аерозольних частинок можна представити рівнянням:

$$\eta_{diff}(d_c, D_k) = 2 \left( \frac{\sqrt{3}\pi D_{diff}}{4D_k U(D_k)} \right)^{2/3} \left[ \frac{(1-\alpha)(3\sigma+4)}{J+\sigma K} \right]^{1/3}, \quad (5.98)$$

де щільність поглинаючого середовища  $\alpha$  визначається як об'ємна частка крапель;



$\sigma$  – відношення в'язкості рідкого поглинаючого середовища до газової фази;

$$J = 1 - \frac{6}{5}\alpha^{1/3} + \frac{1}{5}\alpha^2;$$

$$K = 1 - \frac{9}{5}\alpha^{1/3} + \alpha + \frac{1}{5}\alpha^2.$$

Коефіцієнт дифузії  $D_{diff}$  частинок аерозолі:

$$D_{diff} = \frac{k_B T K_K(d_q)}{3\pi\mu d_q}, \quad (5.99)$$

де  $k_B$  – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура, К;

$\mu$  – в'язкість газової фази, кг/м·с;

$K_K$  – поправочний коефіцієнт ковзання Каннінґему, який застосовується у разі коли частки аерозолі розміром менше 15 мкм, в іншому випадку приймається рівним 1.

У разі руху частинки аерозолі за умовною траєкторією назустріч краплі рідини, у момент наближення до неї на відстань не менше радіусу частинки, можливий механізм захоплення цієї частки краплею рідини – механізм «перехоплення». Ефективність осадження частинок за рахунок ефекту захоплення [391]:

$$\eta_{int}(d_q, D_K) = \left( \frac{D_K + d_q}{D_K} \right). \quad (5.100)$$

В описаних умовах [392] ефективність захоплення частинок аерозолі краплею рідини за рахунок механізму захоплення визначається рівнянням:

$$\eta_{int}(d_q, D_k) = \frac{1-\alpha}{J+\sigma K} \left[ \frac{R}{1+R} + \frac{1}{2} \left( \frac{R}{1+R} \right)^2 (3\sigma+4) \right], \quad (5.101)$$

де  $R = d_q / D_k$ .

Проводячи кількісну оцінку розмірів частинок і крапель рідини в апараті, можна визначити ефективність механізму захоплення  $\eta_{int}(d_q, D_k) = 0,5\%$  при  $d_q = 5$  мкм,  $D_k = 2 \cdot 10^{-3}$  м та характерному розмірі пластин у зоні вихроутворення 0,05 м.

Для частинок аерозолію розміром понад 15 мкм ключовим механізмом їх видалення в апараті з РПН є інерційне осадження [326]. Безрозмірна величина, яка визначає характеристики інерційної взаємодії частинок – число Стокса:

$$Stk = \frac{\rho_q d_q^2 U(D_k)}{18\mu D_k}, \quad (5.102)$$

де  $d_q$  – щільність частинок.

Для оцінки ефективності зіткнення частинок аерозолію з краплями рідини за рахунок інерційного механізму можна скористатися рівнянням у роботі [393]:

$$\eta_{imp}(d_q, D_k) = \left( \frac{Stk}{Stk + 0,35} \right)^2. \quad (5.103)$$

Загальна ефективність взаємодії частинок аерозолію з краплею поглинаючої рідини з урахуванням механізму дифузії, перехоплення та інерції можна представити сумою рівнянь (5.75), (5.77) та (5.80). Слід уточнити, що розв'язання суми цих рівнянь є складним математичним завданням, що не дає змоги отримати аналітичні залежності для різних за дисперсним складом аерозолів. Тому першочерговим завданням необхідно допустити кілька

наближень для оцінки ефективності взаємодії частинок аерозолі і крапель рідини, що поглинає.

Швидкість руху крапель поглинаючої рідини з урахуванням робіт [394, 395] можна визначити як:

$$U(D_k) = c_1 D_k^{c_2}, \quad (5.104)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – константи, які враховують режимно-конструктивні параметри апарату та визначаються експериментальним шляхом.

У роботі [396] проведено дослідження порівняння ефективності взаємодії за рахунок трьох механізмів, залежно від діаметра частинок аерозолі. Виходячи з графічних залежностей, для більших частинок ( $d_p > 15$  мкм) переважає інерційний механізм взаємодії, для дрібніших ( $d_p < 15$  мкм) – дифузійний.

З урахуванням даних роботи [397] перспективним підходом до вирішення задачі ефективної взаємодії системи частки аерозолі – краплі поглинаючої рідини є розгляд дифузійного та інерційного механізмів. При цьому механізмом захоплення різних дисперсного складу частинок аерозолі можна знехтувати через незначний вклад у сумарну ефективність осадження.

Існує розмір частинок, для яких ні дифузія, ні інерційне зіткнення ефективно не дозволяють видаляти частинки – мінімальний діаметр частинки для ефективної взаємодії з краплею рідини, що поглинає. Для визначення мінімального діаметра частинок аерозолі скористаємося даними про ефективність осадження за рахунок дифузійного та інерційного механізму.

Для уточнення ефективності дифузійної взаємодії використовуємо апроксимацію поправочного коефіцієнта ковзання Каннінгема наступним рівнянням:

$$K_K = \text{Max} \left[ 1,664 \left( \frac{2\lambda}{d_q} \right), 2,609 \sqrt{\frac{2\lambda}{d_q}} \right]. \quad (5.105)$$

Використовуючи цю апроксимацію, у роботі [397] отримали аналітичне рішення для часток різного дисперсного складу в апаратах мокрого очищення з переважним дрібнодисперсним розміром частинок (дифузійний механізм взаємодії).

Для оцінки ефективності механізму інерційної взаємодії використовуємо наближення з роботи [392]:

$$\eta_{imp}(d_q, D_d) = \text{Min} [3,4Stk^{9/5}, 1]. \quad (5.106)$$

Підставивши рівняння (5.98) – (5.100), (5.104) та (5.105) у рівняння (5.96), отримаємо залежність для оцінки взаємодії крапель рідини з частинками аерозолі, для яких переважає дифузійний механізм:

$$\beta_{diff}(d_q, D_k) = A d_q^{-1} D_k^{(4+c_2)/3}, \quad (5.107)$$

де

$$A = \frac{\pi}{2} \left[ \frac{c_1 \lambda (1 - \alpha) (3\sigma + 4)}{24(J + \sigma K)} \right]^{1/3} \left( \frac{2,609 k_B T}{\mu} \right)^{2/3}. \quad (5.108)$$

Підставивши рівняння (5.101), (5.103) та (5.105) у рівняння (5.96), отримаємо залежність для оцінки взаємодії крапель рідини з частинками аерозолі, для яких переважає інерційний механізм:

$$\beta_{imp}(d_q, D_k) = B d_q^{18/5} D_k^{(1+14c_2)/5}, \quad (5.109)$$

де

$$B = \frac{3,4\pi c_1^{14/5}}{4} \left( \frac{\rho_q}{18\mu} \right)^{9/5}. \quad (5.110)$$

Для визначення мінімального ефективного діаметра частинки, яка може взаємодіяти з краплею рідини, необхідно врахувати дифузійний та інерційний механізми. Взаємодія вищезгаданих аерозольних частинок і крапель можна представити сумою рівнянь (5.106) та (5.108):

$$\beta(d_q, D_k) = A d_q^{-1} D_k^{(4+c_2)/3} + B d_q^{18/5} D_k^{(1+14c_2)/5}. \quad (5.111)$$

Розглянемо рівняння (5.88) як однорідне диференціальне та вирішивши його отримаємо залежність для визначення мінімального ефективного діаметра взаємодії частинок дрібнодисперсної зваженої речовини та краплі поглинаючої рідини:

$$d_{q \min} = \left( \frac{5A}{18B} \right)^{5/23} D_k^{(17-37c_2)/69}. \quad (5.112)$$

Отримана залежність (5.112) дає можливість визначити значення мінімального діаметра твердої зваженої частинки, яка може бути уловлена краплею рідини в апаратах з РПН, і може знайти застосування широкого діапазону діаметра крапель поглинаючої рідини та їх кількості в обсязі апарату. Для вибору значень  $c_1$  і  $c_2$  було прийнято характеристики експериментальних стендів апаратів мокрої очистки [398]. Результати розрахунку для різних рівноважних діаметрів крапель, притаманних різного турбулентного потоку в апараті ( $D_k = 1 - 7$  мм) і щільності зрошення поглинаючої рідини представлені (рис. 5.13).

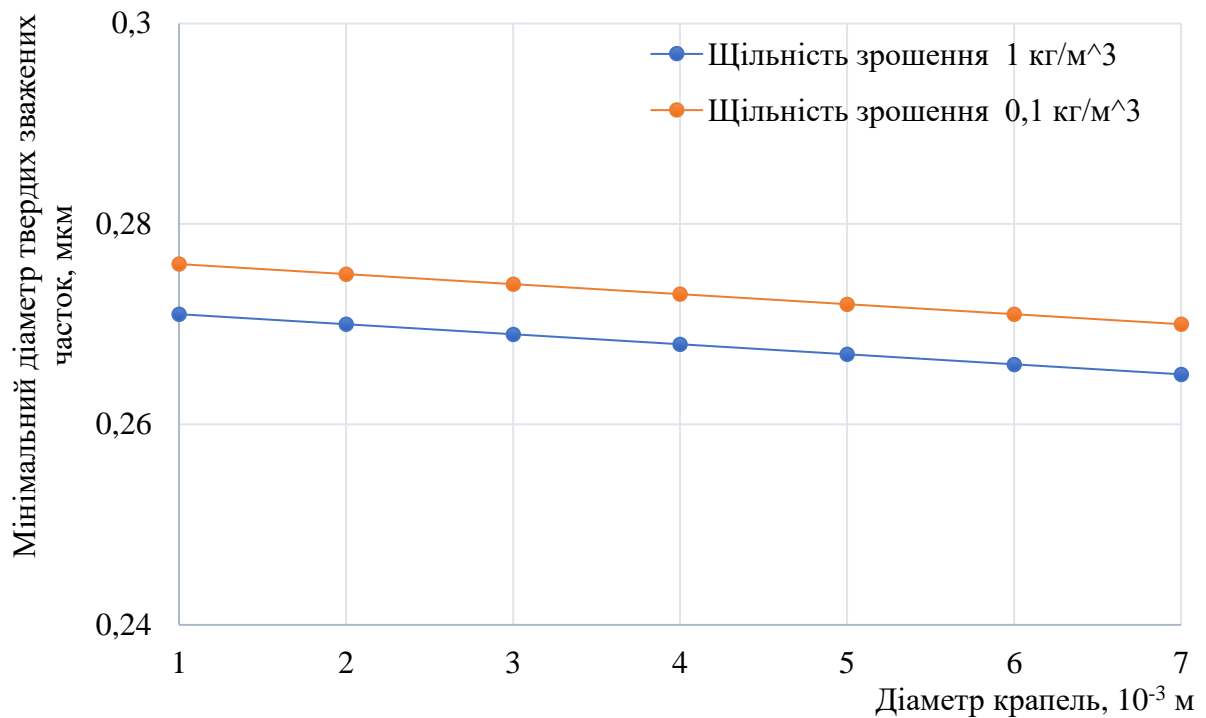


Рисунок 5.13 – Мінімальний ефективний діаметр твердих зважених часток за різного діаметру крапель та щільності зрошення поглинаючої рідини

Проведені розрахунки дозволяють говорити, що мінімальний ефективний діаметр твердих зважених часток, які уловлюватимуться краплями рідини в апараті з РПН, без урахування ефектів у першій зоні апарату становить не менше 0,3 мкм, що говорить про можливість роботи з дрібнодисперсними аерозольними викидами промисловості.

## 5.8 Висновки та узагальнення до розділу 5

1. Внаслідок лабораторних досліджень було запропоновано конструкції апаратів з РПН (форсунковий та ежекційний тип), що поєднують у собі можливості створення у робочій зоні організованих вихрових зон і мають широкий діапазон стійкої роботи. Дослідження гідродинаміки встановили, що робочим режимом для форсункового і ежекційного типу апарату з РПН є режим прямого потоку (10-12 м/с). Вихровий перебіг потоку в апаратах з РПН та

його відривний (пульсаційний) характер руху значною мірою сприяє інтенсифікації процесів укрупнення та осадження частинок забруднюючих речовин.

2. На основі експериментальних досліджень двох варіантів апаратів з РПН та з урахуванням ідентичності гідродинамічних режимів залежно від швидкості газу, питомого зрошення або вихідного рівня рідини, а також конструктивних параметрів, отримано рівняння гідравлічного опору для ежекційного і форсункового апарату з РПН.

3. Максимальна ефективність пиловловлення дрібнодисперсного пилю в досліджуваному ежекційному апараті з РПН становить 99,6% при швидкостях газу 10 м/с та висоти початкового рівня рідини в зоні ежекції +0,03 м. Максимальна ефективність пиловловлення дрібнодисперсного пилю в форсунковому апараті з РПН становить 99,4% при швидкостях газу 12 м/с та щільності зрошення  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Що говорить про високу ефективність розроблених конструкцій обладнання.

4. В розділі розглянуто математичну картину взаємодії пилогазового потоку з парорідинною сумішшю – конденсаційний механізм укрупнення дрібнодисперсних зважених речовин в форсунковому типі апаратів з РПН. Проведено дослідження механізму утворення і математичну модель вихрового потоку під час проходження циліндричних елементів, які реалізують коагуляційний механізм зростання дрібнодисперсних зважених забруднюючих речовин в ежекційному типі апаратів з РПН.

Укрупнення дрібнодисперсних зважених речовин у першій зоні апарату відбувається за рахунок механізму конденсаційного зростання, а також турбулентної та броунівської коагуляції. В результаті розрахунків отримані рівняння для визначення радіусу частинки в процесі конденсації парогазорідинної системи, що дозволяє визначити подальшу можливість уловлювання частинок за рахунок інерційного або турбулентно-дифузійного механізму.

5. Вперше математично описано процес розподілу рівноважних крапель у прямоточному масообмінному апараті з регулярною рухомою насадкою. Отримано рівняння для розрахунку діаметра крапель поглинаючої рідини внаслідок дроблення рідинних потоків турбулізуючими елементами насадки у верхній частині апарату, яке вказує на розвинену поверхню контакту фаз за рахунок великої кількості елементів насадки, що генерують міжфазну поверхню.

Розглянуто механізм утворення краплинної структури на насадковому елементі в момент утворення крапель. Порівняння експериментальних даних з результатами розрахунків за рівняннями (5.86), (5.89), (5.90), (5.91), (5.92) та (5.94) свідчить про їхню хорошу збіжність ( $\pm 11\%$ ).

6. Проведено дослідження механізмів осадження дрібнодисперсних зважених речовин, здатних захоплюватися краплинами рідини в апараті з РПН, залежно від параметрів дисперсного складу речовини. Обґрунтовано вибір дифузійного та інерційного механізмів осадження частинок, як переважаючого в апаратах з РПН. Проведені розрахунки дозволили отримати мінімальний ефективний діаметр зважених частинок (0,3 мкм), які можуть бути захоплені краплями рідини в апараті з РПН, що свідчить про можливість роботи з широкою номенклатурою пилогазових промислових викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини.

Вищезазначене дозволяє стверджувати про можливість ефективного використання апаратів з РПН для комплексної очистки пилогазових викидів промислових виробництв від дрібнодисперсних зважених речовин з мінімальним негативним впливом на навколишнє природне середовище.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [308, 322, 326, 352, 353, 389].



## ВИСНОВКИ

З метою зниження техногенного навантаження від викидів промисловості, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, здійснено обґрунтування наукових засад системного підходу з розробкою математичної моделі поширення забруднюючих речовин, розробки методики вибору природоохоронного обладнання та дослідження високоефективних конструкцій пилоочисного обладнання. У дисертаційній роботі сформовано наукові положення, висновки та рекомендації, сукупність яких представляє нові науково обґрунтовані результати у галузі екологічної безпеки.

1. Проаналізовано фактори екологічної небезпеки від промислових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини. Унаслідок аналізу статистичних баз даних встановлено, що основними джерелами забруднення атмосфери дрібнодисперсними зваженими речовинами є промислові підприємства, а також що морфометричні й фізико-хімічні характеристики дрібнодисперсних твердих частинок ( $PM_{2,5}$ ) становлять значну екологічну небезпеку.

2. У результаті аналізу відповідності законодавчої бази України вимогам Європейського Союзу щодо охорони атмосферного повітря доведено необхідність проведення системної роботи зі створення й удосконалення національної системи щодо зниження викидів забруднюючих речовин. Зниження техногенного навантаження від викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, передбачає розроблення та впровадження сучасних моніторингових систем, засобів інформування громадськості, методик обґрунтованого вибору пилоочисного обладнання й використання на виробництві високоефективних пилоочисних апаратів.

3. Аналіз екологічних ризиків від забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом підтвердив кореляційний зв'язок із показниками здоров'я населення (втратою років життя населення країни у зв'язку з

хворобою, інвалідністю та передчасною смертю (DALY), передчасної смертності населення), що зумовлює розробку алгоритму і математичної моделі дальності поширення дрібнодисперсних зважених речовин у приземному шарі атмосфери для інформування громадськості.

В основі алгоритму моделі поширення дрібнодисперсних зважених речовин використано рівняння розподілу домішок у турбулентному середовищі з подальшим нормуванням та параметризацією умов. Програмну реалізацію алгоритму здійснено в середовищі РТС Mathcad Prime 7. Одержано розподіл концентрацій домішок для різних значень турбулентності атмосферного повітря (10–155 м<sup>2</sup>/с) та небезпечної швидкості вітру (5–10 м/с). Перевірка адекватності математичної моделі на основі графічних візуалізацій розрахунків свідчить про ефективність прийнятої моделі, що задовольняє вимоги природоохоронного законодавства з урахуванням різних вихідних параметрів джерел викидів та умов розподілу домішок.

4. Розроблено Web-додаток для оцінки дальності поширення забруднюючих речовин від джерела їх викидів із використанням HTML-розмітки, CSS-стилів і мови програмування JavaScript. Web-додаток є спрощеною програмою для оброблення алгоритму математичної моделі поширення забруднюючих речовин і може використовуватися в системах моніторингу для оцінки й контролю техногенного впливу промислових підприємств на навколишнє природне середовище та інформування громадськості на різних рівнях.

5.3 метою забезпечення ефективного вибору пилогазоочисного обладнання розроблено методики з використанням теорії графів та методу послідовної ієрархічної кластеризації. Програмно реалізовано механізм вибору пилогазоочисного обладнання за допомогою online-сервісу електронних таблиць на основі зіставленні параметрів трьох баз даних: характеристик забруднюючих речовин, технологічних умов середовища та параметрів пилогазоочисного обладнання.

6. На основі лабораторних досліджень запропоновано конструкції апаратів із РПН (форсунковий та ежекційний типи), що забезпечують створення організованих вихрових зон у робочій зоні апарата і мають широкий діапазон стійкої роботи. Одержано рівняння для розрахунку гідравлічного опору ежекційного й форсункового типів апарата з РПН. За допомогою досліджень гідродинаміки встановлено, що робочим режимом для форсункового й ежекційного типів апарата з РПН є режим прямої течії (10–12 м/с). Вихровий режим руху потоку в апаратах із РПН та його відривний (пульсаційний) характер сприяють інтенсифікації процесів збільшення та осадження дрібнодисперсних частинок забруднюючих речовин.

Досліджено й математично описано процес розподілу і механізм утворення крапель у робочій зоні прямої течійного масообмінного апарата з регулярною пульсаційною насадкою. Отримано математичну залежність для розрахунку діаметра крапель поглинальної рідини внаслідок дроблення рідинних потоків турбулізуючими елементами насадки у верхній частині апарата, що вказує на розвинену поверхню контакту фаз.

7. Розроблені конструкції апаратів із РПН забезпечують видалення дрібнодисперсних домішок  $PM_{2.5}$  із пилогазових викидів. Максимальна ефективність пиловловлювання дрібнодисперсного пилу в досліджуваному ежекційному апараті з РПН становить 99,6 % за швидкостей газу 10 м/с та висоти початкового рівня рідини в зоні ежекції +0,03 м. Максимальна ефективність пиловловлювання дрібнодисперсного пилу у форсунковому апараті з РПН становить 99,4 % за швидкостей газу 12 м/с та щільності зрошення  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Досліджено механізми осадження дрібнодисперсних зважених речовин, уловлюваних краплинами рідини в апараті з РПН, залежно від дисперсного складу твердих частинок. Проведені розрахунки дозволили одержати мінімальний ефективний діаметр зважених частинок (0,3 мкм), які можуть бути захоплені краплинами рідини в апараті з РПН, що свідчить про можливість роботи з широкою номенклатурою пилогазових викидів промисловості, які містять дрібнодисперсні зважені речовини.

8. Проведено математичний опис конденсаційного та коагуляційного механізмів збільшення дрібнодисперсних зважених речовин у дослідних конструкціях апаратів із РПН. Одержано рівняння для розрахунку діаметра крапель поглинальної рідини внаслідок дроблення рідинних потоків турбулізувальними елементами насадки у верхній частині апарата. Математичні моделі дозволяють проектувати конструкції апаратів для вловлювання дрібнодисперсного пилу.

9. Результати досліджень, проведених у роботі, реалізовано як практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво двох типів апаратів із регулярною пульсаційною насадкою, що працюють в режимі розвиненої турбулентності, для комплексного очищення викидів виробництва на базі ДУ «Ніохім», м. Харків, та СП «Технополіс», м. Суми. Результати дисертаційних досліджень передані до ПрАТ «Інститут «Сумипроєкт» для реалізації розробленої методології вибору пилогазоочисного обладнання та розрахунку ефективності роботи апаратів для очищення викидів від дрібнодисперсних зважених речовин. Державна екологічна інспекція в Сумській області впровадила в роботу рекомендації й математичну модель щодо прогнозування й розрахунку зони забруднення атмосферного повітря внаслідок викидів дрібнодисперсних зважених речовин.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ

1. World Health Organization. Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. *WHO Regional Office for Europe*. 2013. Режим доступу: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/153692>.
2. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. *World Health Organization*. 2021. Режим доступу: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
3. Butler T. M., Lawrence M. G. The influence of megacities on global atmospheric chemistry: A modelling study. *Environmental Chemistry*. 2009. Vol. 6, no. 3. P. 219–225.
4. Twomey S. Aerosols, clouds and radiation. *Atmospheric Environment. Part A Gen*. 1991. Top. 25. P. 2435–2442.
5. Rohini L. B., Woo-Seop L., P.R.C. Rahul. Aerosol types and radiative forcing estimates over East Asia. *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 141. P. 532–541.
6. Kaskaoutis D. G., Gautam R., Singh R. P., Houssos E. E., Goto D., Singh S., Bartzokas A., Kosmopoulos P. G., Sharma M., Hsu N. C., Holben B. N., Takemura T. Influence of anomalous dry conditions on aerosols over India: Transport, distribution and properties. *Journal of Geophysical research*. 2012. Vol. 117. D09106. <https://doi.org/10.1029/2011JD017314>.
7. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues / Hallquist M. et al // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 9. P. 5155–5236. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5155-2009>.
8. Kahn R., Yu H., Schwartz S., Chin M., Feingold G., Remer L., Rind D., Halthore R., DeCola P. Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts.

*National Aeronautics and Space Administration: Washington, DC, USA. 2009. 116 p.*

9. Добровольская Л. А., Ключев Д. С. Прогнозирование степени загрязнения атмосферного воздуха в промышленном регионе. *Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2018. Вип. 36, С. 216–223.

10. Karagulian F., Belis C., Dora C., Prüss-Ustün A., Bonjour S., Rohani H., Ammann M. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment.* 2015. Vol. 120, P. 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>.

11. Gupta P., Khan M. N., Silva A., Patadia F. Atmospheric Pollution quantity and quality of the data for air quality monitoring. *Atmospheric Pollution Research.* 2013. Vol. 4 (1), P. 43–52. <https://doi.org/10.5094/APR.2013.005>.

12. Farrow A., Miller K. A. TOXIC AIR: THE PRICE OF FOSSIL FUELS (Issue February). 2020. Режим доступа: <https://storage.googleapis.com/planet4-southeastasia-stateless/2020/02/21b480fa-toxic-air-report-110220.pdf> (дата звернення: 14.01.2020).

13. Cogut A. Open Burning of Waste: A Global Health Disaster. *R20 Regions of Climate Change. October, 2016.* Режим доступа: [https://regions20.org/wp-content/uploads/2016/08/OPEN-BURNING-OF-WASTE-A-GLOBAL-HEALTH-DISASTER\\_R20-Research-Paper\\_Final\\_29.05.2017.pdf](https://regions20.org/wp-content/uploads/2016/08/OPEN-BURNING-OF-WASTE-A-GLOBAL-HEALTH-DISASTER_R20-Research-Paper_Final_29.05.2017.pdf) (дата звернення: 14.01.2020).

14. Anjum M. S., Ali S. M., Imad-Ud-Din M., Subhani M. A., Anwar M. N., Nizami A. S., Ashraf U., Khokhar M. F. An Emerged Challenge of Air Pollution and Ever-Increasing Particulate Matter in Pakistan; A Critical Review. *Journal of Hazardous Materials.* 2020, Vol. 402, 123943. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123943>.

15. Li Z., Hu B. Perceived health risk, environmental knowledge, and contingent valuation for improving air quality: new evidence from the Jinchuan mining area in China // *Economics & Human Biology.* 2018. Vol. 1, P. 54–68.

16. Rybicka E. H. Impact of mining and metallurgical industries on the environment in Poland // *Applied Geochemistry*. 1996. Vol. 11(1–2), P. 3–9.

17. Pohrebennyk V., Korostynska O., Dzhumelia E., Mason A., Cygnar M. Technogenic pollution of soil due to mining and chemical enterprises. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, Bulgaria*. 2016. Vol. 2, P. 363–370.

18. Yan H., Ding G., Li H., Wang Y., Zhang L., Shen Q., Feng K. Field evaluation of the dust impacts from construction sites on surrounding areas: A city case study in China. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(7), P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/su11071906>.

19. Onistratenko N. V., Ivantsova E. A., Denysov A. A., Solodnikov D. A. Heavy metals in suburban ecosystems of industrial centers and ways of their reeducation. *Ekológia (Bratislava)*. 2016. Vol. 35, No. 3, P. 205–212. <https://doi.org/10.1515/eko-2016-0016>.

20. Yigitcanlar T, Dizdaroglu D. Ecological approaches in planning for sustainable cities. A review of the literature. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2015. Vol. 1(2), P. 159–188. <https://doi.org/10.7508/gjesm.2015.02.008>.

21. Sheveleva O. B., Slesarenko E. V., Vagina N. D., Mishchenko V. V. Assessment of the industrial load impact on the ambient air state. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020. P. 862. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/6/062011>.

22. Sheveleva O. B., Slesarenko E. V., Mishchenko V. V., Kiselev A. B. The relationship of technical-and-technological and ecological components of the mining region development. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019. P. 315. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/5/052060>.

23. Werners S. E., Donaldson M. C. Diversifying to cope with Environmental Change. Responsible life-science innovations for development in the digital age. *EVOCA View project*. 2015. Режим доступа:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.539.1923&rep=rep1&type=pdf>. (дата звернення: 10.07.2022).

24. Smedley T. Particulate Matters. *Clearing the Air*. 2019. P. 71–92. <https://doi.org/10.5040/9781472953292.0008>.

25. Hurets L. L., Kozii I. S., Miakaieva H. M. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of Engineering Sciences*. 2017. Vol. 4(2). P. 12. [https://doi.org/10.21272/jes.2017.4\(2\)](https://doi.org/10.21272/jes.2017.4(2)).

26. Gorlenko N. V., Timofeeva S. S. Assessment of environmental damage to atmospheric air during development of oil and gas fields. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. P. 687 066011.

27. Abalakov A. D., Bazarova N. B. Assessment of man-made impact of mining on the environment of the Baikal-Mongolian region. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. P. 381 012001.

28. Bai C., Dallasega P., Orzes G., Sarkis J. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *Int. J. Production Economics*. 2020. P. 229. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>.

29. Sarkis J., Zhu Q. Environmental sustainability and production: taking the road less travelled. *International Journal of Production Research*. 2018. Vol. 56 (1–2), P. 743–759.

30. Yigitcanlar T., Dizdaroglu D. Ecological approaches in planning for sustainable cities: A review of the literature. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2015. Vol. 1(2). P. 159–188.

31. Tang D., Wang C., Nie J., Chen R., Niu Q., Kan H., Chen B., Perera F. Health benefits of improving air quality in Taiyuan, China. *Environment International*. 2014. Vol. 73. P. 235–242. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.016>.

32. Ippolitova N. A. Industrial impact on the environment (as exemplified by the Baikal region and Mongolia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018. P. 190. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/190/1/012009>.



33. Karner K., Mckenna R., Klobasa M., Kienberger T. Industrial excess heat recovery in industry-city networks: A technical, environmental and economic assessment of heat flexibility. *Journal of Cleaner Production*. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.045>.

34. Luo Z., Chen Y., Cen K., Pan H., Zhong M., He J. Research on comprehensive environmental impact assessment of shale gas development. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2020. Vol. 18 No. 1, P. 1–20. <https://doi.org/10.1108/JEDT-11-2018-0205>.

35. Oguzcan S., Dvarioniene J., Tugnoli A., Kruopiene J. Environmental impact assessment model for substitution of hazardous substances by using life cycle approach. *Environmental Pollution*. 2019. P. 254. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.113>.

36. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2021. Режим доступу: <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=CPL>. (дата звернення: 20.10.2021).

37. Державна служба статистики України. Викиди забруднюючих речовин і парникових газів у атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення 2004–2020 року. 2020. Режим доступу: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch\\_vzrap\\_u.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzrap_u.htm). (дата звернення: 12.10.2021).

38. van Erp A. M., Kelly F. J., Demerjian K. L., Pope III C. A., Cohen A. J. Progress in research to assess the effectiveness of air quality interventions towards improving public health. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2012. Vol. 5(2). P. 217–230. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0127-y>.

39. Kozii I. Investigation of the influence of finely dispersed solid substances of the atmospheric air on humans. *Environmental problems*. 2022. Vol. 7, No. 1. P. 7–13. <https://doi.org/10.23939/ep2022.01.007>.

40. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. №796-р // Урядовий кур'єр. 2017. №226.

41. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері промислового забруднення : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 22 травня 2019 р. № 402-Р. // Офіційний вісник України. 2019. № 49. Ст. 1677. С. 68.

42. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря : Постанова Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 р. № 827// Офіційний вісник України. 2019. №70. Ст. 2451. С.108.

43. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28 лютого 2019 р. № 2697-VIII // Офіційний вісник України. 2019. № 28. Ст. 980. С.29.

44. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату. Ратифіковано Законом № 435/96-ВР від 29.10.1996 р. ВВР, 1996, № 50, ст.277). Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_044#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text) (дата звернення: 25.01.2022).

45. Кіотський протокол до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. №995\_801: ЗУ №1430-IV від 17 листопада 2006 року. Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_801#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801#Text) (дата звернення: 25.01.2022).

46. Конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані №995\_223: ЗУ №2707-XII від 16.10.1992р. Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_223#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_223#Text) (дата звернення: 25.01.2022).

47. Віденська конвенція про охорону озонового шару № 995-088 від 22.03.1985 р. // Офіційний вісник України. 2005. № 21. Ст. 1179. С. 240.

48. Монреальський протокол про речовини, що руйнують озоновий шар: ООН № 995\_215 від 16.09.1987 р. Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/MU87002R> (дата звернення: 25.01.2022).

49. Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі : закон України від 18.04.2007 р. №949-V // Відомості Верховної Ради України. 2007. № 30. Ст. 396. С. 1016.

50. Наказ МОЗ України від 14.01.2020 р. №52 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в

атмосферному повітрі населених місць» Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20#Text> (дата звернення: 10.01.2022).

51. Leonard R. L. Emission Reductions and Offsets. *Air Quality Permitting*. 2018. P. 81–91. <https://doi.org/10.1201/9781315137070-4>.

52. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Режим доступу: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj> (дата звернення: 12.02.2022).

53. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). Режим доступу: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj> (дата звернення: 12.02.2022).

54. Угода про Асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами – членами, з іншої сторони від 26.09.2014 р. // Офіційний вісник України. 2014. № 75. Ст. 2125. 83 с.

55. Актуалізація та доповнення Додатків ХХХ та ХХХІ. Угода про Асоціацію між Україною та ЄС (Довкілля та зміна клімату) / Ресурсно-аналітичний центр «Суспільство і довкілля». Львів, 2019. 17 с.

56. Про схвалення розроблених Міністерством екології та природних ресурсів планів імплементації деяких актів законодавства ЄС : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.04.2015 р. № 371-Р // Офіційний вісник України. 2015. №31. Ст. 907. С.30.

57. Бахарєв В. С. Екологічна безпека регіону в умовах техногенного пилового забруднення атмосферного повітря. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 «Екологічна безпека» Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2006. 179 с.

58. Шмандий В. М. Стратегия управления экологической безопасностью: общие теоретические положения и региональный аспект. *Вісник КДПУ*. 2003. Вип. 2 (19). С. 160–163.

59. Харламова О. В., Мальований М. С., Пляцук Л. Д. Теоретичні основи управління екологічною безпекою техногенно навантаженого регіон. *Екологічна безпека*. 2012. № 1(13). С. 9–12.
60. Іванюта С. П., Качинський А. Б. Екологічна безпека регіонів України: порівняльні оцінки. *Стратегічні пріоритети*. 2013. №3 (28). С. 157–164.
61. Триснюк В. М., Трофимчук О. М., Триснюк Т. В. Екологічна безпека техноприродних геосистем регіону. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. Вип. 5. С. 30–34.
62. Адаменко О. М., Міщенко Л. В. Екологічний аудит територій. Івано-Франківськ : Факел, 2010. 342 с.
63. Шмандій В. М. Научно-методические принципы исследования состояний техногенной безопасности в регионе. *Вісник КДПУ*. 2002. Вип. 5(16). С. 19–24.
64. Гулич О. І. Регулювання екологічної безпеки регіону: європейський досвід. *Соціально-екологічні проблеми сучасного періоду України*. 2014. Вип. 3(107). С. 145–152.
65. Кравців В. С., Жук П. В. Концептуальні засади формування механізму регулювання екологічної безпеки у транскордонному регіоні. *Регіональна економіка*. 2015. Вип. №4. С. 66–72.
66. Гавадзин Н. О., Тришак Л. С. Критерії оцінки екологічних ризиків та інтегральний показник рівня екологічної безпеки регіону. *Вісник ОНУ ім. І. І. Мечнікова*. 2017. Т. 22, вип. 10(63). С. 149–152.
67. Боронос В. Г., Довга Л. В. Методичні підходи щодо оцінки рівня безпеки регіону шляхом розширення системи екологічних індикаторів. *Науковий вісник ЧДІЕУ*. 2014. Вип. №4(24). С. 52–59.
68. Безсонов Є. М., Андрєєв В. І. Обґрунтування та формалізація підходу до оцінювання екологічної безпеки регіону. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2016. Вип. 2 (10 (80)). С. 9–18.
69. Шмандій В. М. Управління екологічною безпекою на регіональному рівні (теоретичні та практичні аспекти). Автореферат дисертації на здобуття

наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 «Екологічна безпека». Харків, 2003. 36 с.

70. Полищук В. С., Шмандий В. М., Полищук Д. В. Связь годичных биоритмов человека и неблагоприятных метеорологических условий в экологии. *Оценка техногенного воздействия на природную среду. Новые технологии очистки промвыбросов, возвратных вод, переработки и утилизации отходов: Сб. научн. трудов.* 1996. Кременчуг : КФ ХГПУ. С. 22–23.

71. Гурець Л. Л. Науково-методологічні основи екологічної безпеки при забрудненні атмосферного повітря газопиловими викидами промислових підприємств. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 «Екологічна безпека». Суми, 2017. 313 с.

72. Хазан В. Б., Хазан П. В. Визначення екологічної безпеки на підставі дослідження системи екологічних ризиків. *Екологія і природокористування.* 2013. Вип. 16. С. 64–70.

73. Вавулин П. А., Бойко Т. В. Расчет прогнозного техногенного риска промышленных объектов при эксплуатации. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2014. №10 (71). С. 42–46.

74. Barabash O., Weigang G., Dychko A., Zhelnovach G., Belokon K. Modeling a set of management approaches for the effective operation of the environmental management system at the business entities. *Ecological Engineering & Environmental Technology.* 2021. Vol. 22(6), P. 1–10. <https://doi.org/10.12912/27197050/141895>.

75. Junguitu D. A., Allur E. The adoption of environmental management systems based on ISO 14001, EMAS, and Alternative Models for SMEs: A Qualitative Empirical Study. *Sustainability.* 2019. Vol. 11(7015), P. 1–17.

76. Voinea C. L., Hoogenberg B. J., Fratostiteanu C., Hashmi H. B. A. The relation between environmental management systems and environmental and financial performance in emerging economies. *Sustainability.* 2020. Vol. 12(5309), P. 1–21.

77. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосовування (ISO 14001:2015, IDT). Київ, 2016. 37 с.

78. Daniel C. Esty. The 2012 Environmental Performance and Pilot Trend Environmental Performance Index. *Yale Center for Environmental Law and Policy, Center for International Earth Science Information Network*. 2012. 99 p.

79. Калугін В. Д., Тютюнник В. В., Черногор Л. Ф., Шевченко Р. І. Розробка науково-технічних основ для створення системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки. *Системи обробки інформації*. 2013. Вип. 9 (116), С. 204–216.

80. Бодаченко Т.П., Бондаренко Г.А., Падчук Е.А., Николенко В.Ю. Динамика выявления профессиональных и профессионально обусловленных пылевых заболеваний. *Вестник гигиены и эпидемиологии*. 1998. № 1(3), С. 52.

81. Work-related lung diseases. Asbestos-related lung diseases. ELF Patient Factsheet. *Breath*. 2008. Vol.4, №3. P. 295–300.

82. Lee K., Park J., Kang M., Kim D., Batmunkh T., Bae M.S., Park K. Chemical characteristics of aerosols in coastal and urban ambient atmospheres. *Aerosol and Air Quality Research*. 2017. Vol. 17. P. 908–919.

83. Alam K., Shaheen K., Blaschke T., Chishtie F., Khan H.U., Haq B.S. Classification of aerosols in an urban environment on the basis of optical measurements. *Aerosol and Air Quality Research*. 2016. Vol. 16. P. 2535–2549.

84. UNECE. (n.d.). Air pollution and health - Air Pollution - Environmental Policy (Website). Режим доступу: <https://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlirtapwelcome/cross-sectoral-linkages/air-pollution-and-health.html> (дата звернення: 12.11.2020).

85. World Bank. Air Pollution Deaths Cost Global Economy US \$225 Billion (Press Release). 2016. Режим доступу: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/09/08/air-pollution-deaths-cost-global-economy-225-billion> (дата звернення: 12.11.2020).

86. World Health Organization (WHO). 7 million deaths linked to air pollution annually NIEHS: new WHO collaborating centre for environmental health Network to advance progress in children' s environmental health Launch of WHO International Scheme to Evaluate Household Water Treatment Techn, 63. 2014. Режим доступа: [http://www.who.int/phe/eNews\\_63.pdf?ua=1](http://www.who.int/phe/eNews_63.pdf?ua=1) (дата звернення: 12.11.2020).

87. Piet G. J., Knights A. M., Jongbloed R. H., Tamis J. E., de Vries P., Robinson L. A. Ecological risk assessments to guide decision-making: Methodology matters. *Environmental Science and Policy*. 2017. Vol. 68, P. 1–9.

88. Choi Y., Ghim Y. S., Holben B N. Identification of columnar aerosol types under high aerosol optical depth conditions for a single AERONET site in Korea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016. Vol. 121. P. 1264–1277. <https://doi.org/10.1002/2015JD024115>.

89. Mian Chin, Diehl T., Dubovik O., Eck T. F., Holben B. N., Sinyuk A., Streets D. G. Light absorption by pollution, dust, and biomass burning aerosols: A global model study and evaluation with AERONET measurements. *Annales Geophysicae*. 2009. Vol. 27. P. 3439–3464.

90. Dubovik O., Smirnov A., Holben B. N., King M. D., Kaufman Y. J., Eck T. F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. P. 9791–9806. <https://doi.org/10.1029/2000JD900040>.

91. Kim J., Lee J., Lee H. C., Higurashi A., Takemura T., Song C. H. Consistency of the aerosol type classification from satellite remote sensing during the Atmospheric Brown Cloud–East Asia Regional Experiment campaign. *Journal of Geophysical Research*. 2007. Vol. 112, D22S33.

92. Pöschl U. Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*. 2005. Vol. 44(46). P. 7520–7540.



93. Atwood S. A. Classification of aerosol using a cluster model. Classification of aerosol population type and cloud condensation nuclei properties in a coastal California littoral environment using an unsupervised cluster model. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 19. P. 6931–6947.

94. Chen Q-X., Huang C-L., Yuan Y., Mao Q-J., Tan H-P. Spatiotemporal Distribution of Major Aerosol Types over China Based on MODIS Products between 2008 and 2017. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. P. 703.

95. Web-програма проекту Всесвітнього індексу якості повітря. Режим доступу: <https://waqi.info/uk/> (дата звернення: 17.01.2022).

96. SaveEcoBot – екологічний чат-бот. Режим доступу: <https://www.saveecobot.com/> (дата звернення: 17.01.2022).

97. Milinevsky G., Danylevsky V. Atmospheric Aerosol Over Ukraine Region: Current Status of Knowledge and Research Efforts. *Frontiers in Environmental Science*. 2018. Vol. 6. P. 59-1–59-21. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00059>.

98. Юдашкин М. Я., Карлов М. П., Волынчик П. Р. Оборудование установок очистки газов и вентиляции. Київ : Вища школа, 1991. 288 с.

99. Чекман И. С., Сырочая А. О., Андреева С. В., Макаров В. А. Аэрозоли – дисперсные системы: Монография. Харків : «Цифрова друкарня №1», 2013. 100 с.

100. Fuchs N. A., Sutugin A. G. High-dispersed aerosols. *International Reviews in Aerosol Physics and Chemistry*. 1971. Page 1. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-016674-2.50006-6>.

101. Hidy G. M. Aerosols, an industrial and environmental science. Academic Press, London. 1984. 774 p.

102. Панасенко А. І. Технологія очищення від аерозолів. Донецьк : ДВНЗ «Дон НТУ», 2008. 119 с.

103. Hidy G. M. Aerosols and Atmospheric Chemistry. New York : Academic Press, 1972. 366 p.

104. Kondratyev K. Ya. Climatic Effects of Aerosols and Clouds. Springer London, 1999. 264 p.



105. Tsuji H., Makino H., Yoshida H. Classification and collection of fine particles by means of backward sampling. *Powder Technology*. 2001. Vol. 118. P. 45–52.
106. Hyvönen S. A look at aerosol formation using data mining techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 5. P. 3345–3356.
107. Sunita V., Divya P., Philippe R., Swagata P., J.-L. A., Manish S. A new classification of aerosol sources and types as measured over Jaipur, India. *Aerosol and Air Quality Research*. 2015. Vol. 15. P. 985–993. <http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2014.07.0143>.
108. Cheng M.-D. Classification of Volatile Engine Particles // *Aerosol and Air Quality Research*. 2013. Vol. 13. P. 1411–1422. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.01.0011>.
109. Toledano C. Airmass Classification and Analysis of Aerosol Types at El Arenosillo (Spain). *Journal of applied meteorology and climatology*. 2009. Vol. 48. P. 962–981.
110. Sohyeon J., Hyung L., Narae C., Ji L., Yun A., Yong K. Classification and Characterization of Organic Aerosols in the Atmosphere over Seoul Using Two Dimensional Gas Chromatography-time of Flight Mass Spectrometry (GC × GC/TOF-MS) Data / Jeon S. H. et al // *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2019. Vol. 13, no. 2. P. 88–98. <http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2019.13.2.088>.
111. Falah S., Kizel F., Banerjee T., Broday D. M. Accounting for the aerosol type and additional satellite-borne aerosol products improves the prediction of PM<sub>2.5</sub> concentrations / Somaya F. et al // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 320. 121119. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121119>.
112. Miikka D. M., Markku K., Ilona R., Robert W. Formation and Growth of Fresh Atmospheric Aerosols: Eight Years of Aerosol Size Distribution Data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland. *Boreal Environment Research*. 2005. Vol. 10. P. 323–336.

113. Kunkel D., Lawrence M. G., Tost H., Kerckweg A., Jöckel P., Borrmann S. Urban emission hot spots as sources for remote aerosol deposition. *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39. L01808. <https://doi.org/10.1029/2011GL049634>.

114. Rodríguez S., Cuevas E., González Y., Ramos R., Romero P. M., Pérez N., Querol X., Alastuey A. Influence of sea breeze circulation and road traffic emissions on the relationship between particle number, black carbon, PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5–10</sub> concentrations in a coastal city. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. P. 6523–6534.

115. Remer L., Kaufman Y. J. Dynamic aerosol model – Urban/industrial aerosol. *Journal of Geophysical research*. 1998. Vol. 103(D12). P. 13859–13871.

116. Almeida S. M. Ambient particulate matter source apportionment using receptor modelling in European and Central Asia urban areas. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266, P. 115–199.

117. Calvo A. I., Alves C., Castro A., Pont V., Vicente A. M., Fraile R. Research on aerosol sources and chemical composition: past, current and emerging issues. *Atmospheric Research*. 2013. Vol. 120. P. 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.021>.

118. Abdul-Razzak H., Ghan S., Rivera-Carpio C. A parameterisation of aerosol activation. Part I: Single aerosol type. *Journal of Geophysical research*. 1998. Vol. 103. P. 6123–6132.

119. Basart S. Aerosol characterization in Northern Africa, Northeastern Atlantic, Mediterranean Basin and Middle East. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 9. P. 8265–8282.

120. Краснюк Е.П. Пылевые заболевания легких у рабочих промышленного производства Украины. *Український пульмонологічний журнал*. 1998. Вип. 4. С. 13–16.

121. Belis C. A., Pisoni E., Degraeuwe B., Peduzzi E., Thunis P., Monforti-Ferrario F., Guizzardi D. Urban pollution in the Danube and Western Balkans regions: the impact of major PM<sub>2.5</sub> sources. *Environment International*. 2019. Vol. 133. P. 105–158.

122. Diapouli E., Manousakas M., Vratolis S., Vasilatou V., Maggos Th., Saraga D., Grigoratos Th., Argyropoulos G., Voutsas D., Samara C., Eleftheriadis K. Evolution of air pollution source contributions over one decade, derived by PM10 and PM2.5 source apportionment in two metropolitan urban areas in Greece. *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 164. P. 416–430.

123. ДСТУ ISO 14001:2006. Системи екологічного керування. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO14001:2004, IDT).

124. ДСТУ ISO 14004:2006 Системи екологічного управління. Загальні настанови щодо принципів, систем та засобів забезпечення (ISO 14004:2004, IDT).

125. Козій І. С., Пляцук Л. Д., Гурець Л. Л., Трунова І. О. Врахування параметрів аерозольних викидів під час розробки технологічних рішень зменшення впливу на довкілля. *Техногенно-екологічна безпека*. 2021. Вип. №1 (9). С. 3–10.

126. Козій І. С., Жиленко Т. І. Розробка моделі синтезу обґрунтованого вибору природоохоронного обладнання. Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції. *Сучасні технології у промисловому виробництві*. (Суми, 19–22 квітня 2022 р.). Суми : СумДУ, 2022. С. 136–137.

127. Козій І. С. Математичне обґрунтування вибору ефективних технологічних рішень для зменшення впливу на довкілля. Матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції «*Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022*». (Полтава – Львів, 26–27 травня 2022 р.). Полтава : НУПП, 2022. С. 302–304.

128. Козій І. С. Системний аналіз для зниження техногенного навантаження на довкілля пилових викидів і забезпечення цілей сталого розвитку. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «*Сталий розвиток країни в рамках європейської інтеграції*». (Житомир, 30 листопада 2022 р.). Житомир : ДУ «Житомирська політехніка», 2022. С. 57.

129. Kozii I., Plyatsuk L., Koval V. Algorithm for Selection Equipment to Reduce the Technogenic Effect on the Environment. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. №1 (53). P. 58–66.

130. Козій І. С. Системний підхід до вибору природозахисного обладнання // *Техногенно-екологічна безпека*. 2022. Вип. №1 (11). С. 48–54.

131. Chapman P. M., Wang F., Janssen C. R., Goulet R. R., Kamunde C. N. Conducting ecological risk assessments of inorganic metals and metalloids: current status. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2003. Vol. 9(4), 641–697.

132. Lang J., Zhou Y., Chen D., Xing X., Wei L., Wang X., Zhao N., Zhang Y., Guo X., Han L., Cheng S. Investigating the contribution of shipping emissions to atmospheric PM<sub>2.5</sub> using a combined source apportionment approach. *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 229. P. 557–566.

133. Institute of Health Metrics and Evaluation. State of global air 2019. Special report. Health Effects Institute Boston, MA. 2019. Режим доступу: [https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga\\_2019\\_report.pdf](https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf) (дата звернення: 20.012.2020).

134. Junaid M., Syed J.H., Abbasi N.A., Hashmi M.Z., Malik R.N., Pei D.S. Status of indoor air pollution (IAP) through particulate matter (PM) emissions and associated health concerns in South Asia. *Chemosphere*. 2018. Vol. 191. P. 651–663. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.097>.

135. Plyatsuk L., Vaskin R., Vaskina I., Kozii I. Modeling of waterborne pollution of roadside soils. *Journal of engineering sciences*. 2017. Vol. №4, Issue 2. P. G1–G5.

136. Козій І. С., Макаренко Н. А. Определение кадмия в почве урбанизированных территорий и его влияние на здоровье человека. *Вісник Кременчуцького державного університета імені М. Остроградського. Кременчук*. 2012. Вип. №5 (76). С. 123–125.

137. Кундієв Ю. І., Нагорна А. М. Професійне здоров'я в Україні. Київ : ВД «Авіцена», 2006. 316 с.

138. Guttikunda S. K., Goel R. Health impacts of particulate pollution in a megacity-Delhi, India. *Environmental Development*. 2013. Vol. 6(1). P. 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2012.12.002>.
139. Fecht D., Fischer P., Fortunato L., Hoek G., de Hoogh K., Marra M., Kruize H., Vienneau D., Beelen R., Hansell A. Associations between air pollution and socioeconomic characteristics, ethnicity and age profile of neighbourhoods in England and the Netherlands. *Environmental Pollution*. 2015. Vol. 198. P. 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.014>.
140. Hans M. S. G., Schäfer R. O., McClellan F. W. Toxicology. Academic Press, 1999. 1330 p.
141. Colbeck I. Physical and Chemical Properties of Aerosols. Springer Netherlands, 1998. 465 p.
142. Paul A., Baron K. W. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. Wiley, 2001. 1131 p.
143. Kan H., Chen R., Tong S. Ambient air pollution, climate change, and population health in China. *Environment international*. 2012. Vol. 42(1), P. 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.03.003>.
144. Scovronick N. Reducing Global Health Risks. World Health Organization, 2015. 148 p.
145. Ramírez A. S., Ramondt S., Van Bogart K., Perez-Zuniga R. Public awareness of air pollution and health threats: challenges and opportunities for communication strategies to improve environmental health literacy. *Journal of Health Communication*. 2019. Vol. 24(1), P. 75–83. <https://doi.org/10.1080/10810730.2019.1574320>.
146. Sénéchal H., Visez N., Charpin D., Shahali Y., Peltre G., Biolley J.P., Lhuissier F., Couderc R., Yamada O., Malrat-Domenge A., Pham-Thi N., Poncet P., Sutra J.P. A review of the effects of major atmospheric pollutants on pollen grains, pollen content, and allergenicity. *ScientificWorldJournal*. 2015. P. 1–29. <https://doi.org/10.1155/2015/940243>.

147. Verbeek T. Unequal residential exposure to air pollution and noise: A geospatial environmental justice analysis for Ghent, Belgium. *SSM - Population Health*. 2019. Vol. 7. 100340. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2018.100340>.
148. Bell M. L., Ebisu K. Environmental inequality in exposures to airborne particulate matter components in the United States. *Environmental Health Perspectives*. 2012. Vol. 120(12). P. 1699–1704. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205201>.
149. Schwartz J. Particulate Air Pollution and Chronic Respiratory Disease. *Environmental Research*. 1993. Vol. 62, Issue 1, P. 7–13. <https://doi.org/10.1006/enrs.1993.1083>.
150. Fasogbon S. K., Oyelami F. H., Adetimirin E. O., Ige E. O. On blasius plate solution of particle dispersion and deposition in human respiratory track. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2019. Vol. 6(3). P. 428–432. <https://doi.org/10.18280/mmep.060314>.
151. Hassan Bhat T., Jiawen G., Farzaneh H. Air Pollution Health Risk Assessment (AP-HRA), Principles and Applications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18(4). P. 1935. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041935>.
152. Jia R., Luo M., Liu Y. et al. Anthropogenic aerosol pollution over the eastern slope of the Tibetan plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2019. Vol. 36(8). P. 847–862. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8212-0>.
153. Hu Y., Wang S., Yang X., Kang Y., Ning G., Du H., Environment Impact of winter droughts on air pollution over Southwest China. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 664. P. 724–736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.335>.
154. Paciorek C. J., Liu Y. Assessment and statistical modeling of the relationship between remotely sensed aerosol optical depth and PM<sub>2.5</sub> in the eastern United States. *Research Reports / Health Effects Institute*. 2012. Vol. 167. P. 5–83.

155. C H., Y L., Y H. Global estimation of effect on life expectancy at age of 60 by particulate air pollution. *Environmental Epidemiology*. 2019. Vol. 3. P. 151. <https://doi.org/10.1097/01.ee9.0000607424.22484.46>.

156. W G., X Z. Acute effects of personal exposure to fine particulate matter on pulmonary health. *Environmental Epidemiology*. 2019. Vol. 3. P. 144. <https://doi.org/10.1097/01.ee9.0000607336.33679.d4>.

157. Козій І. С., Петроченко К. В. Пилові викиди та їх вплив на здоров'я людини. Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. *Сучасні технології у промисловому виробництві*. (Суми, 18–21 квітня 2017 р.). Суми : СумДУ, 2017. С. 130.

158. Козій І. С., Вихрова А. Ю. Вплив аерозольних викидів на довкілля. Матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції. *Сучасні технології у промисловому виробництві*. (Суми, 20–23 квітня 2021 р.). Суми : СумДУ, 2021. С. 189–190.

159. Jang A. Particulate Air Pollutants and Respiratory Diseases. *Air Pollution – A Comprehensive Perspective*. 2012. chapter 6. P. 153–174. <https://doi.org/10.5772/51363>.

160. Veremchuk L. V., Tsarouhas K., Vitkina T. I., Mineeva E. E., Gvozdenko T. A., Antonyuk M. V., Rakitskii V. N., Sidletskaya K. A., Tsatsakis A. M., Golokhvast K. S. Impact evaluation of environmental factors on respiratory function of asthma patients living in urban territory. *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 235. P. 489–496. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.122>.

161. Kim Y. Status of Air Pollutant Emissions and Health Impact of LNG Cogeneration Plant in Administrative City, Republic of Korea. *EGU General Assembly 2020. Online*. 4–8 May 2020, EGU2020-7626. 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7626>.



162. Raffetti E., Treccani M., Donato F. Cement plant emissions and health effects in the general population: A systematic review. *Chemosphere*. 2019. Vol. 218. P. 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.088>.

163. Go L. H., Cohen R. A. Coal mine dust lung disease. *Occupational and Environmental Lung Disease*. 2020. P. 176–189. <https://doi.org/10.1183/2312508x.10034919>.

164. Козій І. С., Рой І. О., Яхненко О. М., Пономаренко Р. В., Щербак С. С. Математично-статистичне дослідження впливу дрібнодисперсних твердих забруднюючих речовин на здоров'я людини. *Техногенно-екологічна безпека*. 2021. Вип. 10(2). С. 23–27. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2021.2.4>.

165. Moreno T., Trechera P., Querol X., Lah R., Johnson D., Wrana A., Williamson B. Trace element fractionation between PM10 and PM2.5 in coal mine dust: Implications for occupational respiratory health. *International Journal of Coal Geology*. 2019. Vol. 203, P. 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.01.006>.

166. Ishtiaq M., Jehan N., Khan S. A., Muhammad S., Saddique U., Iftikhar B. Potential harmful elements in coal dust and human health risk assessment near the mining areas in Cherat, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25(15), P. 14666–14673. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1655-5>.

167. Roy I., Kozii I. Mathematical and statistical study of the influence of air pollutants on human. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference* (Oxford, May 28, 2021). Oxford-Vinnitsia: P.C. Publishing House & European Scientific Platform. Vol. 1. P. 191–194.

168. Xu L., Shu X. Aggregate Human Health Risk Assessment from Dust of Daily Life in the Urban Environment of Beijing. *Risk Analysis*. 2014. Vol. 34(4). P. 670–682. <https://doi.org/10.1111/risa.12168>.

169. Taiwo A. M., Michael J. O., Gbadebo A. M., Oladoyinbo F. O. Pollution and health risk assessment of road dust from Osogbo metropolis, Osun state,



Southwestern Nigeria. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2019. Vol. 26(5). P. 1254–1269.

<https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1563478>.

170. Trojanowska M., Świetlik R. Investigations of the chemical distribution of heavy metals in street dust and its impact on risk assessment for human health, case study of Radom (Poland). *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2019. Vol. 26(7), P. 1907–1926.

<https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1619070>.

171. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 22 травня 2019 р. № 402–р «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері промислового забруднення».

172. Shah J., Mishra B. IoT-enabled Low Power Environment Monitoring System for prediction of PM<sub>2.5</sub>. *Pervasive Mob. Comput.* 2020. Vol. 67. 101175

<https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2020.101175>.

173. Hatefi S. M., Tamošaitienė J. Construction projects assessment based on the sustainable development criteria by an integrated fuzzy AHP and improved GRA model. *Sustainability*. 2018. Vol. 10(4). <https://doi.org/10.3390/su10040991>.

174. Singh A. P., Chakrabarti S., Kumar S., Singh A. Assessment of air quality in Haora River basin using fuzzy multiple-attribute decision making techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017. Vol. 189(8). P. 373.

<https://doi.org/10.1007/s10661-017-6075-3>.

175. Brown L. W. Deposition of particles on rough surface during turbulent gas-flow in a pipe. *Atmos. Environ.* 1974. Vol. 8, № 8, P. 801–816.

176. Brown P. S.(jr), Pandolfo J. P. Numerical stability of the combined advectivediffusion equation with nonuniform spatial grid. *Monthly Weather Review*. 1979. Vol. 107, P. 959–962.

177. Rogers C. B., Eaton J. K. The behavior of small particles in a vertical turbulent boundary layer in air. *International Journal of Multiphase Flow*. 1990. Vol. 16. №5. P. 819–834.

178. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наук.думка, 1997. 368 с.
179. Расчет загрязнения атмосферы при аварии на базе модели конвективно-диффузионного переноса примеси / Радкевич А. В. та ін // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2010. Вип. 32. С. 203–205.
180. Berlyand M. E. Prediction and Regulation of Air Pollution. Springer Science & Business Media, 2012. 312 p.
181. Бабков В. С., Ткаченко Т. Ю. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2011. Вип. 13(185). С. 147–155.
182. Cole C. F. Fabrick A. J. Surface mine pit retention. *Journal of Air Pollution Control Association*. 1984. Ver. 34(6). P. 674–675.
183. Беляев Н. Н. Моделирование процесса рассеивания токсичного газа в условиях настройки. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2009. Вип. 29. С. 83–85.
184. Бруяцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Київ : Изд-во ин-та гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
185. Hanna S. Air Quality Modelling over Short Distances *College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling*. 1994. № SMR/760-2. P. 712–743.
186. Степаненко С. Н. Динамика турбулентно-циркуляционных и диффузионных процессов в нижнем слое атмосферы над Украиной. Одесса : Издательство «Маяк», 1998. 269 с.
187. Рудаков Д. В. Математичні моделі в охороні навколишнього середовища. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетровського університету, 2004. 160 с.

188. Ковальова О. М. Аналіз методів моделювання в екології з позицій системології. *Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університета*. 2019. Вып. 85. С. 132–138.

189. Лаврик В. І. Методи математичного моделювання в екології. Київ: Вид. дім «КМ Академія», 2002. 203 с.

190. Попов О. О. Стаціонарна та нестаціонарна математичні моделі розповсюдження забруднення в атмосфері // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій» ISDMIT'2008 р. (Євпаторія, 19-23 травня 2008 р.). В 2 т. С. 34–37.

191. Tirabassi T. Analytical air pollution advection and diffusion models. *Water, Air, & Soil Pollution*. 1989. Vol. 47. P. 19–24. <https://doi.org/10.1007/BF00468993>.

192. Turner B. D. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling (2nd ed.). *CRC Press*. 1994. 192 p. <https://doi.org/10.1201/9780138733704>.

193. Liu D. H. F., Lipták B. G., Bouis P. A. Air Pollution (1st ed.). *CRC Press*. 2000. 256 p. <https://doi.org/10.1201/9781315137056>.

194. Fath B. D., Jørgensen S. E., Cole M. (Eds.). Managing Air Quality and Energy Systems (2nd ed.). *CRC Press*. 2020. 841 p. <https://doi.org/10.1201/9781003043461>.

195. Koren H., Bisesi M. S. Handbook of Environmental Health, Volume II: Pollutant Interactions in Air, Water, and Soil (4th ed.). *CRC Press*. 2002. 904 p. <https://doi.org/10.1201/9780849378003>.

196. Battersby S. (Ed.). Clay's Handbook of Environmental Health (21th ed.). *Routledge*. 2016. 1094 p. <https://doi.org/10.4324/9781315675688>.

197. Spellman F. R. Handbook of Environmental Engineering (1st ed.). *CRC Press*. 2015. 750 p. <https://doi.org/10.1201/b18873>.

198. Manahan S. E. *Fundamentals of Environmental and Toxicological Chemistry: Sustainable Science*, Fourth Edition (4th ed.). *CRC Press*. 2013. 614 p. <https://doi.org/10.1201/b13851>.

199. Arystanbekova N. Kh. Application of Gaussian plume models for air pollution simulation at instantaneous emissions. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2004. Volume 67, Issues 4–5, P. 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2004.06.023>.

200. Mesnard L. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks. *Computers & Geosciences*. 2013. Vol. 52. P. 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.002>.

201. Harkonen J., Valkonen E., Kukkonen J., Rantakrans E., Jalkanen L., Lahtinen K. An operational dispersion model for predicting pollution from a road. *International Journal of Environment and Pollution*. 2014. Vol. 5, No. 4–6. P. 602–610. <https://doi.org/10.1504/IJEP.1995.028407>.

202. Khlaifi A., Ionescu A., Candau Y. Pollution source identification using a coupled diffusion model with a genetic algorithm. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2009. Volume 79, Issue 12. P. 3500–3510. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2009.04.020>.

203. Wang X., Zhang D. Inverse identification of multiple contaminant sources and pollution states using future spatial-temporal information. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Volume 289. 125790. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125790>.

204. Snoun H., Bellakhal G., Kanfoudi H. One-way coupling of WRF with a Gaussian dispersion model: a focused fine-scale air pollution assessment on southern Mediterranean. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 22892–22906. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05486-3>.

205. Beevers S. D., Kitwiroon N., Williams M. L., Carslaw D. C. One way coupling of CMAQ and a road source dispersion model for fine scale air pollution predictions. *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 59. P. 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.034>.

206. Bullock O. R., Alapaty K., Herwehe J. A. An observation-based investigation of nudging in WRF for downscaling surface climate information to 12-km grid spacing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2014. Vol. 53. P. 20–33. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-030.1>.

207. Ghannam K., El-Fadel M. Emissions characterization and regulatory compliance at an industrial complex: an integrated MM5/CALPUFF approach. *Atmosphere Environment*. 2013. Vol. 69. P. 156–169. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.12.022>.

208. He J., Glotfelty T., Yahya K. Does temperature nudging overwhelm aerosol radiative effects in regional integrated climate models? *Atmosphere Environment*. 2017. Vol. 154. P. 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.040>.

209. Hong S-Y., Noh Y., Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*. 2006. Vol. 134. P. 2318–2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>.

210. Hu X., Li D., Huang H. Modeling and sensitivity analysis of transport and deposition of radionuclides from the Fukushima Dai-ichi accident. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 14. P. 11065–11092. <https://doi.org/10.5194/acp-14-11065-2014>.

211. Kochanski A. K., Pardyjak E. R., Stoll R. One-way coupling of the WRF-QUIC urban dispersion modeling system. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2015. Vol. 54. P. 2119–2139. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0020.1>.

212. Snoun H., Kanfoudi H., Bellakhal G., Chahed J. Validation and sensitivity analysis of the WRF mesoscale model PBL schemes over Tunisia using dynamical downscaling approach. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2019. Vol. 4. P. 13. <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0103-3>.

213. A. Boubrima, W. Bechkit and H. Rivano. Optimal WSN Deployment Models for Air Pollution Monitoring. *IEEE Transactions on Wireless*

*Communications*. 2017. Vol. 16, no. 5. P. 2723-2735.  
<https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2658601>.

214. Stockie J. M. The mathematics of atmospheric dispersion modeling. *SIAM Review*. 2011. Vol. 53, no. 2. P. 349–372.

215. Datta A., Banerjee S., Finley A. O., Hamm N. A. S., Schaap M. Nonseparable dynamic nearest neighbor gaussian process models for large spatio-temporal data with an application to particulate matter analysis. *The annals of applied statistics*. 2016. Vol. 10(3). P. 1286–1316. <https://doi.org/10.1214/16-AOAS931>.

216. Nicoletta L., Daniele S., Aristide G., Diego B., Massimo P. Pollution Dispersion from a Fire Using a Gaussian Plume Model. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2020. Vol. 10, No. 4. P. 431–439.  
<https://doi.org/10.18280/ijssse.100401>.

217. Nicoletta L., Filomena G., Aristide G., Daniele S. Forecasting model validation of particulate air pollution by low cost sensors data. *Journal of Model Optimization*. 2019. Vol. 11(2). P. 63–68.  
<https://doi.org/10.32732/jmo.2019.11.2.63>.

218. Zhu Q., Liu Y., Jia R., Hua S., Shao T., Wang B. A numerical simulation study on the impact of smoke aerosols from Russian forest fires on the air pollution over Asia. *Atmospheric Environment*. 2018. Vol. 182. P. 263–274.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.052>.

219. Ferrero E., Alessandrini S., Anderson B., Tomasi E., Jimenez P., Meech S. Lagrangian simulation of smoke plume from fire and validation using ground-based lidar and aircraft measurements. *Atmospheric Environment*. 2019. Vol. 213. P. 659–674. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.049>.

220. Luhar A. K., Emmerson K. M., Reisen F., Williamson G. J., Cope M. E. Modelling smoke distribution in the vicinity of a large and prolonged fire from an open-cut coal mine. *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 229. P. 117471.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117471>.

221. Hurley P. J., Physick W. L., Luhar A. K. TAPM: a practical approach to prognostic meteorological and air pollution modelling. *Environmental Modelling Software*. 2005. Vol. 20(6). P. 737–752. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.04.006>.

222. Huang R., Qin M., Hu Y., Russell A. G., Odman M. T. Apportioning prescribed fire impacts on PM<sub>2.5</sub> among individual fires through dispersion modeling. *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 223. P. 117260. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117260>.

223. Fasogbon S. K., Oyelami F. H., Adetimirin E. O., Ige E. O. On blasius plate solution of particle dispersion and deposition in human respiratory track. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2019. Vol. 6(3). P. 428–432. <https://doi.org/10.18280/mmep.060314>.

224. Sofia D., Lotrecchiano N., Giuliano A., Barletta D., Poletto M. Optimization of number and location of sampling points of an air quality monitoring network in an urban contest. *Chemical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 74. P. 277–282. <https://doi.org/10.3303/CET1974047>.

225. Hu G., Li G., Zheng Y., Zhang Z., Xu Y. Euler–Lagrange modeling of wood chip gasification in a small-scale gasifier. *Journal of the Energy Institute*. 2015. Volume 88, Issue 3. P. 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.08.002>.

226. Nielinger J., Röckle R., Höf H.-C., Kost W.-J. Lagrange versus eulerian dispersion modeling comparison for investigations concerning air pollution caused by traffic / et all // *9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 2005. P. 129–132.

227. Yingmin Y. Comments on «Virtual Simulation of Pollution Diffusion in Oil Pollution Accidents». *Ekoloji*. 2019. Issue 108. P. 997–1001.

228. Schelhaas M. J., Kramer K., Peltola H. Introducing tree interactions in wind damage simulation. *Ecological Modelling*. 2017. Vol. 207(2). P. 197–209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.04.025>.

229. Zhang X., Nie W., Peng H., Chen D., Du T., Yang B., Niu W. Onboard air curtain dust removal method for longwall mining: Environmental pollution



prevention. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Volume 9, Issue 6. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106387>.

230. Golubnichiy A. A., Nedelina D. O. Review and analysis of the modelling of the atmospheric air pollution for urban air basins // *Вестник евразийской науки*. 2015. Vol. 7 (5 (30)). P. 120. <http://dx.doi.org/10.15862/02TangVN515>.

231. Martin-Villalba C., Manzur M. E., Urquia A. Virtual lab in Modelica for air pollution control. *Computer tools in education. Algorithmic mathematics and mathematical modeling*. 2018. Vol. (1). С. 5–15.

232. Amelina L. V., Biliaiev M. M. Numerical simulation of air pollution in case of unplanned ammonia release. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2017. Вып. (3 (69)). С. 7–14.

233. Zhiyue Z., Yuping W., Quanxiang W. A characteristic centred finite difference method for a 2D air pollution model. *International Journal of Computer Mathematics*. 2011. Vol. 88:10. P. 2178–2198, <https://doi.org/10.1080/00207160.2010.534139>.

234. Wang H., Mai J., Song Y., Wang C., Zhang L., Tao F., Wang Q. A 3D Visualization Framework for Real-time Distribution and Situation Forecast of Atmospheric Chemical Pollution. *Communications in Computer and Information Science*. 2013. Vol. 402. P. 6. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-45037-2\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45037-2_44).

235. Cheng Y. Gaussian Model Used Gas Pipeline after the Gas Leak Spread. *Petroleum Chemical Industry of Inner Mongolia*. 2010. Vol. 14. P. 49–51.

236. Yang B., Gu X. -M., Zhang F., Zhang F. Development of Simulated Evaluation and Decision Support System of Atmospheric Pollution Dispersion. *Science of Surveying and Mapping*. 2011. Vol. 36(3). P. 147–149.

237. Ebrahimi M., Jahangirian A. New Analytical Formulations for Calculation of Dispersion Parameters of Gaussian Model Using Parallel CFD. *Environmental Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 13(2). P. 125–144.

238. Brzozowska L., Drąg Ł. Application of geographical information systems to evaluation a concentration of chlorine released into an atmosphere in the case of road accident. *Trans Motauto World*. 2018. Vol. 3, Issue 4. P. 169–172.



239. Bai L., Wang J., Ma X., Lu H. Air pollution forecasts: an overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15 (4). P. 1–44. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040780>.
240. Bei N., Zhao L., Xiao B., Meng N., Feng T. Impacts of local circulations on the wintertime air pollution in the Guanzhong Basin. *China Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 592. P. 373–390. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.151>.
241. Cai S., Ma Q., Wang S., Zhao B., Brauer M., Cohen A., Martin R. V., Zhang Q., Li Q., Wang Y., Hao J., Frostad J., Forouzanfar M. H., Burnett R. T. Impact of air pollution control policies on future PM<sub>2.5</sub> concentrations and their source contributions in China. *Journal Environment Management*. 2018. Vol. 227. P. 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.052>.
242. García Nieto P. J., Álvarez Antón J. C. Nonlinear air quality modeling using multivariate adaptive regression splines in Gijón urban area (Northern Spain) at local scale. *Appl. Math. Comput.* 2014. Vol. 235. P. 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.02.096>.
243. Karroum K., Lin Y., Chiang Y. Y. A review of air quality modeling. *Journal of Metrology Society of India*. 2020. Vol. 35(2), P. 287-300. <https://doi.org/10.1007/s12647-020-00371-8>.
244. Leelőssy Á., Lagzi I., Kovács A., Mészáros R. A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 182. P. 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.009>.
245. Wang H., Yuan B., Hao R., Zhao Y., Wang X. A critical review on the method of simultaneous removal of multi-air-pollutant in flue gas. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 378. P. 122–155. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122155>.
246. Bai L., Wang J., Ma X., Lu H. Air Pollution Forecasts: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15(4). P. 780. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040780>.

247. Sachdeva S., Baksi S. Air Pollutant Dispersion Models: A Review. *Advances in Health and Environment Safety. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*. 2018. P. 203–207 [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7122-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7122-5_20).

248. Islam M. S., Saha S. C., Gemci T., Yang I. A., Sauret E., Ristovski Z., Gu Y. T. Euler-Lagrange prediction of diesel-exhaust polydisperse particle transport and deposition in lung: anatomy and turbulence effects. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 12423. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48753-6>.

249. Brandt J., Silver J. D., Frohn L. M., Geels C., Gross A., Hansen A. B., Hansen K. M., Hedegaard G. B., Skjøth C. A., Villadsen H., Zare A., Christensen J. H. An integrated model study for Europe and North America using the Danish Eulerian Hemispheric Model with focus on intercontinental transport of air pollution. *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 53, P. 156–176. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.011>.

250. Порядок визначення величин фонових концентрацій забруднювальних речовин в атмосферному повітрі. Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України № 286 від 30.07.2001 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0700-01#n15>.

251. Ravshanov N., Tashtemirova N. Advanced model of transfer process and diffusion of harmful substances in the atmospheric boundary layer. *Theoretical & Applied Science*. 2017. Vol. 46. P. 129–138. <https://doi.org/10.15863/TAS.2017.02.46.24>.

252. Попов О. О. Математичне моделювання розповсюдження техногенного забруднення від підприємств паливної енергетики. *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2009. Вип. 51. С. 73–84.

253. Сердюцька Л. Ф., Попов О. О. До огляду моделей розповсюдження домішок в атмосфері міста. *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2008. Вип. 45. С. 67–80.

254. Беляєв Н. Н. Математическе моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в водній і повітряній середі. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності – 05.13.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи». Дніпропетровськ, 1996. 502 с.

255. Akingunola A., Makar P. A., Zhang J., Darlington A., Li S.-M., Gordon M., Moran M. D., Zheng Q. A chemical transport model study of plume-rise and particle size distribution for the Athabasca oil sands. *Atmos. Chem. Phys.* 2018. Vol. 18. P. 8667–8688. <https://doi.org/10.5194/acp-18-8667-2018>.

256. Pavel P. V. Mathematical modeling of unsteady turbulent diffusion by using Finite Element Method. *Proceedings of the III region. Conf. "University science - the North Caucasus region"*. Stavropol: NCSTU, 1999. P. 7.

257. Jagota V., Sethi A. P. S., Kumar K. Finite element method: an overview. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*. 2013. Vol. 10(1). P. 1–8.

258. Shi C., Xu M., Guo H., Zhang M., Tang J. A graph to graphs framework for retrosynthesis prediction. *In International conference on machine learning*. 2020. P. 8818–8827. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.12725>.

259. Polorecka M., Kubás J., Danihelka P., Petrlová K., Stofkova K., Bugarová K. Use of software on modeling hazardous substance release as a support tool for crisis management. *Sustainability*. 2021. Vol. 13(1). P. 438. <http://dx.doi.org/10.3390/su13010438>.

260. Belihov A. B., Legotin D. L., Sukhov A. K. Modern computer models of the spread of pollutants in the atmosphere. *Vestnik KSU, Natural Science*. 2013. № 1. P. 14.

261. Biramo Z. B., Mekonnen A. A. Modeling the potential impacts of automated vehicles on pollutant emissions under different scenarios of a test track. *Environmental Systems Research*. 2022. Vol. 11, 28. <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00276-2>.

262. Uliasz M., Stocker R. A., Pielke R. A. Regional modelling of air pollution transport in the south-western USA. *Environmental Modelling*. 1996. Vol. III Comput. Mech. Public. Southampton. p. 34.

263. Heintz J., Belaud J.-P., Gerbaud V. Chemical enterprise model and decision-making framework for sustainable chemical product design. *Computers in Industry*. 2014. Vol. 65. P. 505–520.  
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.01.010>.

264. Chernyavskiy S. Mathematical model of process of distribution of gas pollutants in the atmosphere under different weather conditions. *XX International correspondence scientific-practical conference "Engineering science - From Theory to Practice"*. 2013. P. 17–22.

265. Skob Y. A. Mathematical modeling of emission and dispersion in the atmosphere of gaseous impurities. *News of Kharkov National University: Series "Mathematical modeling. Automation of Management System"*. 2007. № 775. P. 236–245.

266. Smirnov E. A. Information system for the modeling of spread of air pollution using ArcGIS. *Actual questions of technical sciences: Materials of Intern. scientific. Conf.* 2011. P. 27–31.

267. Aloyan A.E., Ermakov A.N., Arutyunyan V.O. Dynamics of trace gases and aerosols in the atmosphere with consideration for heterogeneous processes. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2010. Vol. 46, P. 608–622.  
<https://doi.org/10.1134/S0001433810050063>.

268. Chub A. I. Mathematical model of optimization problem of placing inflammable objects based on topography layout area. *Radionics, computer science, management*. 2013. Vol. № 1. P. 88–93.

269. Sukhinov A. I., Gadelshin V. K., Lyubomischenko D. S. Mathematical model of the spread of harmful emissions from motor vehicles, based on control volume method and its parallel implementation on a cluster of distributed computing. *News of Southern Federal University. Technical science*. 2009. № 2. Vol. 91. P. 8–14.

270. Salazar J. P. L. C., Albani R. Atmospheric boundary layer flow simulations with OpenFOAM using a modified k-epsilon model consistent with prescribed inlet conditions. *13th Spring School on Transition and Turbulence September 19th-23rd, 2022, Blumenau, SC, Brazil.* 2022. <https://doi.org/10.26678/ABCM.EPTT2022.EPT22-0081>.

271. Sharan M., Gopalakrishnan S. G. Mathematical modeling of diffusion and transport of pollutants in the atmospheric boundary layer. *Journal pure and applied geophysics.* 2003. Vol. 160, Issue 1-2. P. 357–394. <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-003-8784-5>.

272. Khan Y., Shekhu M., Sulochana C. Mathematical model for dispersion and diffusion of chemically reactive pollutants from various sources into a boundary layer with dry deposition // *Engineering Computations.* 2013. Vol. 30. Issue 5. P. 707–727. <https://doi.org/10.1108/EC-08-2013-0098>.

273. Smirnova M. N., Nikitin V. F., Pestov D. A., Zhu Z. Mathematical modeling of air pollution in city tunnels and evaluating mitigation strategies. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.* 2020. Vol. 4. 100086. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100086>.

274. Wang Z., Orejon D., Takata Y., Sefiane K. Wetting and evaporation of multicomponent droplets. *Physics Reports.* 2022. Vol. 960. P. 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2022.02.005>.

275. He S., Carmichael G. R., Sandu A., Hotchkiss B., Damian-Iordache V. Application of ADIFOR for air pollution model sensitivity studies. *Environmental Modelling & Software.* 2000. Vol. 15, Issues 6–7. P. 549–557. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00052-9).

276. Sukhinov A., Chistyakov A., Kuznetsova I., Belova Y., Nikitina A. Mathematical model of suspended particles transport in the estuary area, taking into account the aquatic environment movement. *Mathematics.* 2022. Vol. 10. 2866. <https://doi.org/10.3390/math10162866>.

277. Ravshanov N., Shertaev M., Toshtemirova N. Mathematical Model for the Study and Forecast of the Concentration of Harmful Substances in the Atmosphere.

*American Journal of Modeling and Optimization*. 2015. Vol. 3, № 2. P. 35–39.  
<http://dx.doi.org/10.12691/ajmo-3-2-1>.

278. Ravshanov N., Sharipov D. K., Akhmedov D. Modeling of process of environment's pollution, taking into account the terrain and climatic factors. *Information technologies of modeling and management*. 2015. №3. P. 222–235.

279. Nematollahi S., Fakheran S., Soffianian A. Ecological impact assessment of road networks at landscape scale using Spatial Road Disturbance Index (SPROADI). *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2017. Vol. 25(3). P. 297–304. <https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1255218>.

280. K. Muhammad, Munazza N., Asma N., Waseem K., Khalid H. Investigating the nitrogen dioxide concentrations in the boundary layer by using multi-axis spectroscopic measurements and comparison with satellite observations. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24(3). P. 2827–2839. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7907-3>.

281. Goto D., Ueda K., Ng C. F. S., Takami A., Ariga T., Matsushashi K., Nakajima T. Estimation of excess mortality due to long-term exposure to PM<sub>2.5</sub> in Japan using a high-resolution model for present and future scenarios. *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 140, P. 320–332. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.015>.

282. Yang T., Gbaguidi A., Zhang W., Wang X., Wang Z., Yan P. Model-Integration of Anthropogenic Heat for Improving Air Quality Forecasts over the Beijing Megacity. *Aerosol and Air Quality Research*. 2018. Vol. 18. P. 790–802. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.04.0155>.

283. Aimon T., Muhammad K., Zeeshan J., Osama S., Asadullah S. Spatiotemporal evolution of Atmospheric Ammonia Columns Over Indo-Gangetic Plain by Exploiting Satellite Observations. *Advances in Meteorology*. 2019. Article ID 7525479. 11 P. <https://doi.org/10.1155/2019/7525479>.

284. Daniel L., Alexander G., Mathias W. R. Quantifying horizontal and vertical tracer mass fluxes in an idealized valley during daytime. *Atmospheric*



*Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 16. P. 13049–13066. <https://doi.org/10.5194/acp-16-13049-2016>.

285. Cathy W. Y., Guy P. B., Hauke S., Juan P. M. Error induced by neglecting subgrid chemical segregation due to inefficient turbulent mixing in regional chemical-transport models in urban environments. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21. P. 483–503. <https://doi.org/10.5194/acp-21-483-2021>.

286. Lv W., Ji S. Atmospheric environmental quality assessment method based on analytic hierarchy process. *Discrete and Continuous dynamical systems-Series S*. 2019. Vol. 12(4-5). P. 941–955. <https://doi.org/10.3934/dcdss.2019063>.

287. Wang Y., Yan Y., Chen G., Zuo J., Du H. Effective approaches to reduce greenhouse gas emissions from waste to energy process: a China study. *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. Vol. 104 (Part A). P. 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.002>.

288. Idrees Z., Zheng L. Low cost air pollution monitoring systems: A review of protocols and enabling technologies. *Journal of Industrial Information Integration*. 2020. Vol. 17. ID 100123. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.100123>.

289. Zhylenko T., Koziy I., Bozhenko V., Shuda I. Using a web application to realize the effect of AR in assessing the environmental impact of emissions source. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. ID 2731. P. 193–204.

290. Zhu J., Wang H., Li J., Xu Z. Research and Optimization of Meteo-Particle Model for Wind Retrieval. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12(9). ID 1114. <https://doi.org/10.3390/atmos12091114>.

291. Козій І. С., Гурець Л. Л., Будьоний О. П. Моделювання розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері від стаціонарних джерел забруднення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2012. Вип. №66 (972). С. 114–118.

292. Козій І. С. Розробка моделі розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері. Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції молодих вчених: *Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване*

природокористування (Харків, 25–26 листопада 2021 р.) Харків: ХНУ ім. Каразіна, 2021. – С. 81–83.

293. Kozii I., Plyatsuk L., Zhylenko T., Hurets L., Bataltsev Y., Sayenkov D. Development of the turbulent diffusion model of fine suspended substances in the lower atmosphere layer. *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*. 2022. Vol. 28, No. 4. P. 529–535. <http://dx.doi.org/10.5755/j02.ms.30223>.

294. Ali M., Yan C., Sun Z., Wang J., Gu H. CFD simulation of dust particle removal efficiency of a venturi scrubber in CFX. *Nuclear Engineering and Design*. 2013. Vol. 256. P. 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.12.013>.

295. Ali M., Yan C., Sun Z., Gu H., Mehboob K. Dust particle removal efficiency of a venturi scrubber. *Annals of Nuclear Energy*. 2013. Vol. 54. P. 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.11.005>.

296. Пронін В. А., Шпілін Д. І. Досліди зі скруберами насадкового типу. *Кокс і хімія*. 2004. №12. С. 17–23.

297. Бурда Ю. О. Підвищення ефективності очистки газів у скруберах насадкового типу. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності – 05.23.03 «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання». Харків, 2018. 156 с.

298. Bal M., Reddy T. T., Meikap B. C. Removal of HCl gas from off gases using self-priming venturi scrubber. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 364. P. 406–418. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.028>.

299. Bal M., Meikap B. C. Prediction of hydrodynamic characteristics of a venturi scrubber by using CFD simulation. *South african journal of chemical engineering*. 2017. Vol. 24. P. 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.10.006>.

300. Котов Б. І., Грищенко В. О., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д. Підвищення ефективності трубчастих електрофільтрів застосуванням закручування потоку очищуваного повітря. *Енергетика і автоматика*. 2020. №2. P. 123–136. <https://doi.org/10.31548/energiya2020.02.123>.



301. Шиндак Л., Михайлів Н., Федорів М., Галушак І. Підвищення екологічної безпеки теплових електричних станцій шляхом впровадження високоефективних електричних фільтрів. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2019. Vol. 1(10-01). P. 80–86. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2019-10-01-021>.

302. Gabyshev D. N., Fedorets A. A., Aktaev N. E., Klemm O., Andreev S. N. Acceleration of the condensational growth of water droplets in an external electric field. *Journal of Aerosol Science*. 2019. Vol. 135. P. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.06.002>.

303. Byrne M. A., Jennings S. G. Scavenging of sub-micrometre aerosol particles by water drops. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*. 1993. Vol. 27, Issue 14. P. 2099–2105. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90039-2).

304. Cherrier G., Belut E., Gerardin F., Tanière A., Rimbert N. Aerosol particles scavenging by a droplet: Microphysical modeling in the Greenfield gap. *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 166. P. 519–530. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.052>.

305. Gaudel N., Bémer D., Gerardin F. A parametric study of aerosol particle scavenging efficiency by spray droplets. *Journal of Aerosol Science*. 2022. Vol. 159. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105843>.

306. Huang H., Zheng C., Zhao H. Numerical investigation on non-steady-state filtration of elliptical fibers for submicron particles in the «Greenfield gap» range. *Journal of Aerosol Science*. 2017. Vol. 114. P. 263–275. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.09.018>.

307. Гурець Л.Л. Оцінка впливу промислового підприємства на навколишнє середовище. Матеріали V Міжнародної ювілейної науково-практичної конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження». Суми, 2009. С. 48

308. Козій І. С. Using a highly efficient gas cleaning equipment for reduction technogenic impact on the environment. *XXI Міжнародна науково-практична*

конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки». (Київ, 5–9 квітня 2021 р.). Київ : НАУ, 2021. С. 125.

309. Козій І. С. Технологічні рішення уловлювання викидів енергетичних підприємств. *I Міжнародна науково-теоретична конференція «Formation of innovative potential of world science»*. (Тель-Авів, ISR, 07 травня 2021 р.). Тель-Авів: 2021. С. 145–147.

310. Козій І. С., Пляцук Л. Д. Розробка програмного алгоритму вибору природозахисного обладнання. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022* : Колективна монографія. Полтава – Львів: НУПІ імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка» – Дніпро: Середняк Т. К. 2022. С. 313–325.

311. Marangopoulos I. P., Martin C. J., Hutchison J. M. S. Measurement of field distributions in ultrasonic cleaning baths: implications for cleaning efficiency. *Physics in Medicine & Biology*. 2012. P. 1897-908. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/40/11/009>.

312. Губайдуллин Д. А., Зарипов Р. Г., Ткаченко Л. А., Шайдуллин Л. Р. Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения газозвеси в закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму. *Теплофизика высоких температур*. 2017. Том 55. Вып. 3. С. 484–486. <https://doi.org/10.7868/S0040364417030097>.

313. Ратушняк Г. С. Теоретичні основи технології очищення газових викидів. Вінниця: ВДТУ, 2002. 96 с.

314. Шушляков О.В. Підвищення ефективності сухої очистки газів за допомогою інерційних апаратів. Автореферат дисертації на здобуття ступеня доктора технічних наук зі спеціальності – 05.23.03 «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання». Харків: ХАТУБА, 2004. 37 с.

315. Теверовский Б.З. Очистка промышленных газов в черной металлургии. Справочное пособие. Київ: Техніка, 1993. 151 с.

316. Батлук В. А. Акустичні пиловловлювачі. Львів: Афіша, 2000. 208 с.

317. Ескенди́ров М. З. Исследование процесса коагуляционного укрупнения частиц аэрозоля в турбулентных потоках организованной вихревой структуры. *Наука и образование Южного Казахстана*. 2004. №33. С. 39–43.

318. Ескенди́ров М. З. Инерционное осаждение частиц аэрозоля на каплях в слое с регулярным расположением турбулизирующих элементов. *Наука и образование Южного Казахстана*. 2005. №4(44). С. 55–58.

319. Пляцук Л. Д. Гидродинамика, массообмен и пылеулавливание в прямоточных аппаратах с подвижной насадкой: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.17.08. М.: 1991. 36 с.

320. Волненко А. А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: дис. ... докт. техн. наук: 05.17.08. Шымкент: 1999. Т.1. 300 с.

321. Ескенди́ров М. З. Коагуляция и осаждение туманов в прямоточном аппарате с регулярным расположением турбулизирующих элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Шымкент: 1991. 218 с.

322. Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L., Volnenko A. A. Capturing Aerosol Particles in a Device with a Regular Pulsating Nozzle. *Journal of engineering sciences*. 2021. Vol. №8, Issue 2. P. F1–F5.

323. Шарыгин М. П., Мусин Н. А. Анализ эффективности пылеулавливающего оборудования производств фосфора и фосфорных удобрений. *Технология неорганических веществ и минеральных удобрений. Чимкент*. 1986. Т.2. С. 299–303.

324. Товажнянский Л. Л., Моисеев В. Ф., Байрачный В. П., Шапоров В. П. Интенсивные аппараты со стабилизированным слоем пены для очистки отходящих газов : монография. Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. 228 с.

325. Волненко А. А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.17.08 / Шымкент: 1999. 52 с.

326. Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L. Distribution of the dispersed phase in the gas cleaning equipment with pulsating plug. *Problemele Energeticii Regionale*. 2021. Vol. №1(49). P. 29–38. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.1-49.05>.

327. Phillips H. W. Select the proper gas cleaning equipment. *Chemical Engineering Progress*. 2000. Vol. 96. no. 9. P. 19–38.

328. Sutherland K. Choosing equipment: Cleaning air and gas. *Filtration & Separation*. 2007. Vol. 44. no. 1. P. 16–19.

329. Cui L., Song X., Li Y., Wang Y., Y. Feng, Yan L., Dong Y. Synergistic capture of fine particles in wet flue gas through cooling and condensation. *Applied Energy*. 2018. Vol. 225. P. 656–667. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.084>.

330. Sun J., Liu B. Y. H., McMurry P. H., Greenwood S. A Method to Increase Control Efficiencies of Wet Scrubbers for Submicron Particles and Particulate Metals. *Air & Waste*. 1994. Vol. 44. P. 184–185. <https://doi.org/10.1080/1073161X.1994.10467248>.

331. Sui Z. F., Zhang Y. S., Peng Y. Fine particulate matter emission and size distribution characteristics in an ultra-low emission power plant. *Fuel*. 2016. Vol. 185. P. 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.051>.

332. Xu Y., Liu S., W X., Cui J. Field measurements on the emission and removal of PM<sub>2.5</sub> from coal-fired power stations: PM removal performance of wet electrostatic precipitators. *Energy Fuel*. 2016. Vol. 30(9). P. 7465–7473.

333. Kim H. T., Jung C. H., Oh S. N., Lee K. W. Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception, and impaction. *Environmental Engineering Science*. 2001. Vol. 18. P. 125–136.

334. Azapagic A. Environmental Systems Analysis / Chapter 1 in Handbook of Environmental Engineering Book. New Jersey USA: John Wiley & Sons, Inc., 2018. P. 1–12.

335. Примак А. В., Кафаров В. В., Качиашвили К. И. Системный анализ контроля и управления качеством воды и воздуха. Київ: Наукова думка, 1991. 360 с.

336. Масікевич Ю. Г., Шестопапов О. В., Негадайло А. А. Теорія систем в екології: підручник. Суми: Сумський державний університет, 2015. 330 с.

337. Суворов Н. П., Суворова И. Г., Кравченко О. В. Формирование оптимальных систем энергопреобразования на основе использования принципов гармонии и целостности. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 3/10(41). С. 44–46.

338. Шахман І. О., Бистрянцева А. М. Математичний підхід до оцінки результатів екологічних досліджень. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2019. №4(27). С. 124–128.

339. Власов А., Демічковський А., Іващенко О., Лопатьєв А., Пітин М., П'янило Я., Худолій О. Системний підхід і математичне моделювання біологічних та природних об'єктів і процесів. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2016. Вип. 23. С. 17–28.

340. Державна служба статистики України. Заклади охорони здоров'я та захворюваність населення України. Статистичні дані за 2013-2020 роки. Режим доступу: [http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/publzdorov\\_u.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publzdorov_u.htm) (дата звернення: 15.10.2021)

341. Інститут демографії та соціальних досліджень ім. М. В. Птухи Національної Академії Наук України. База даних чисельності населення. Режим доступу: <https://cutt.ly/xb3TPUF>. (дата звернення: 15.10.2021)

342. Козій І. С., Пляцук Л. Д., Гурець Л. Л., Вакал С. В. Паспортизація пилу двоокису титану та пошук шляхів для зменшення його втрат на ВАТ «Сумхімпром». *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського*. 2009. №6(59). С. 193–195.

343. Козій І. С., К. С. Груздо. Санітарна очистка промислових газів від пилу. *Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів*

факультету технічних систем та енергоефективних технологій. (Суми, 18–22 квітня 2011 р.). Суми : СумДУ, 2011. Ч.3. С. 70.

344. Козій І. С., Гурець Л. Л. Дослідження пилових викидів виробництва двоокису титану. *Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки*. Суми. 2012. Вип. №4. С. 180–185.

345. Омаркулов П. К. Механизм взаимодействия потоков в газожидкостной системе. *Хімічна промисловість України*. 2003. №2. С. 31–32.

346. Vacciu D., Bruno A. Deep tree transductions – a short survey. *In Recent Advances in Big Data and Deep Learning*. 2020. P. 236–245.

347. Wu D., Yeong J., Tan G., Chevrier M., Loh J., Lim T., Chen J. Comparison Between UMAP and t-SNE for Multiplex-Immunofluorescence Derived Single-Cell Data from Tissue Sections. *bioRxiv*. 2019. 20 p. <http://dx.doi.org/10.1101/549659>.

348. Lieberman N. P., Lieberman E. T. A working guide to process equipment. NY, NY: McGraw-Hill, 2014. 751 p.

349. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. К.: Техніка, 1975. 168 с.

350. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии. К.: Вища школа, 1976. 184 с.

351. Ziyatdinov N. N. Modeling and Optimization of Chemical Engineering Processes and Systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017. Vol. 51. P. 889–892. <https://doi.org/10.1134/S0040579517060197>.

352. Козій І. С., Пляцук Л. Д., Гурець Л. Л. Математичний опис гідродинаміки високоефективного пилогазоочисного апарату. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2021. Вип. №1 (484). С. 111–116.

353. Козій І. С., Пляцук Л. Д. Дослідження гідродинаміки високоефективного пилогазоочисного обладнання з регулярною пульсаційною насадкою. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2022. Вип. №1 (25). С. 81–89.

354. Андренко П. М., Гречка І. П. Особливості врахування газовмісту робочої рідини при дослідженнях гідросистем. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2009. №2 (24). С. 71 – 73.

355. Моїсєєв В. Ф., Манойло Є. В., Пономарьова Н. Г., Репко К. Ю., Давидов Д. В. Методологія розрахунку режимно-конструктивних і гідродинамічних параметрів пінних апаратів для процесів масообміну. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2018. №16 (1292). С. 165–176.

356. X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78. Brookhaven Instruments Limited [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.brookhaven.co.uk/products/particle-size-analysis>.

357. МВВ № 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. 20 с.

358. Квасніков В. П., Передерко А. Л., Кузьмич Л. В., Котетунов В. Ю. Обробка результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами (в умовах невизначеності). *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. №4 (275). С. 204–208.

359. ДСТУ-Н РМГ 43:2006. Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, IDT).

360. Паракуда В. В., Колпак Б. Д., Чалий В. П. Еволюція вимог до метрології. *Український метрологічний журнал*. 2005. № 3. С. 56–60.

361. Горбатенко І. Ю. Основи наукових досліджень. К.: Вища школа, 2001. 92 с.

362. PTC Mathcad Prime 7. Програмне забезпечення для інженерної математики. Режим доступу: <https://www.mathcad.com/en>.

363. STATISTICA 13.0. Data analysis and visualization program. Режим доступу: <https://statistica.software.informer.com/13.0/>.



364. Стадник Б. І., Мотало В. П., Мотало А. В. Шкали вимірювань: теорія, систематизація та сфери використання. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Вип. 25 (9). С. 339–350.

365. Гончар О. В. Методологічні аспекти оцінювання точності даних статистичних спостережень. *Статистика України*. 2012. Вип. 12. С. 4–10.

366. Бакарджиєв Р. О., Комаров А. О. Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2015. Вип. 28. С. 255–260.

367. Bland M. *An Introduction to Medical Statistics: 4th Revised ed. Edition*. Oup Oxford, 215. 446 p.

368. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories – A review and bibliography. *Atmosphere environment*. 1998. Vol. 32 (6). P. 947–966. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00457-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00457-3).

369. Schwetlick H., Zimmer J. The computation of long time hamiltonian trajectories for molecular systems via global geodesics. *Numerical Mathematics and Advanced Applications 2011*. 2013. P. 227–234. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33134-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33134-3_25).

370. Khorsand Z. Particle trajectories in the serre equations. *Applied Mathematics and Computation*. 2014. Vol. 230 P. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.12.018>.

371. Anderson R. S. Particle trajectories on hillslopes: implications for particle age and <sup>10</sup>Be structure. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2015. Vol. 120 (9). P. 1626–1644. <https://doi.org/10.1002/2015jf003479>.

372. McHaney R. *Understanding computer simulation*. Ventus Publishing, 2009. 172 p.

373. Crockford D. *JavaScript: The good parts*. O'Reilly Media Inc., 2008. 172 p.

374. Mikowski M. S., Powell J. C. *Single Page Web Applications: Javascript end-to-end*. NY: Manning Publications Co, 2014. 433 p.



375. Молчанов В. Н., Лисянский Ю. А., Молчанов А. В. Методы, аппараты и системы промышленной очистки газов. Бушин: EKOLTRONIK CZECH s.r.o., 2011. 680 с.

376. Mokrozub V. G., Farakhshina I. V., Al-Magsusii H. F. H. Selection of equipment types when designing multipurpose chemical plants. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 56. P. 230–236.

377. Borisenko A. V., Karpushkin S. V. Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017. Vol. 53(3). P. 410–419.

378. Mokeddem D., Khellaf A. Optimal solutions of multiproduct batch chemical process using multiobjective genetic algorithm with expert decision system. *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*. 2009. Art. ID 927426.

379. Lee J. H., Shin J., Realff M. J. Machine learning: Overview of the recent progresses and implications for the process systems engineering field. *Computers and Chemical Engineering*. 2018. Vol. 114. P. 111–121.

380. Garcia D. J., Mozaffar M., Ren H., Correa J. E., Ehmann K., Cao J., You F. Sustainable manufacturing with cyber-physical discrete manufacturing networks: Overview and modeling framework. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018. Vol. 141(2). 021013. <https://doi.org/10.1115/1.4041833>.

381. Козій І. С., Жиленко Т. І., Трунова І. О., Батальцев Є. В., Макаренко Н. О. Критерії вибору природозахисного обладнання для очищення промислових викидів підприємств. *Екологічні науки*. 2021. Вип. №6 (39). С. 12–18.

382. Бушуєв С. Д., Трач Р. В. Методи кластеризації мережі учасників реалізації проєкту. *Управління розвитком складних систем*. 2020. Вип. 43. С. 19–25. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.19-25>.

383. Яворський В. Т., Гелеш А. Б., Яворський І. Є., Калимон Я. А. Теоретичний аналіз хемосорбції сульфур(іv) оксиду. обґрунтування вибору ефективного масообмінного апарата. *Eastern-European Journal of Enterprise*

*Technologies*. 2015. Vol. 1, no. 6 (79). P. 32–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60312>.

384. Amelin A. G., Kabanov A. N. Capture of aerosols by operating catalist-zark effect. *Journal of Aerosol Science*. 1987. Vol. 18, Issue 1. P. 43–48. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(87\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0021-8502(87)90008-5).

385. Burghardt A., Bartelmus G., Gancarczyk A. Hydrodynamics of pulsing flow in three-phase chemical reactors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 1999. Vol. 38, Issues 4–6. P. 411–426. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(99\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(99)00039-2).

386. Ляпощенко О. О. Гідродинаміка інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв очищення природного газу. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології». Суми : СумДУ, 2006. 152 с.

387. Kapranova A. B., Verloka I. I. Stochastic description of the formation of flows of particulate components in apparatuses with brush elements. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2018. Vol. 52. P. 1004–1018. <https://doi.org/10.1134/S0040579518050330>.

388. Paim E., Fernández-Nieves A. Generation and Stability of Toroidal Droplets in a Viscous Liquid. *Physical Review Letters*. 2009. Vol. 102, Issue 23. id. 234501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.234501>.

389. Козій І. С., Гурець Л. Л., Трунова І. О., Курбет Т. В. Аналіз гідродинамічних і пиловловлюючих характеристик апарату з провальними тарілками. *Вісник Житомирського державного технічного університету*. 2013. Вип. №4 (67). С. 120–125.

390. Jung C. H., Lee K. W. Filtration of fine particles by multiple liquid drop and gas bubble systems. *Aerosol Science and Technology*. 1998. Vol. 29. P. 389–401. <https://doi.org/10.1080/02786829808965578>.

391. Cheilytko A., Ilin S. Research of cyclone characteristics for dry cleaning of gases from dust. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2020. Vol. 4(3). P. 134–142. <https://doi.org/10.53412/jntes-2020-3.4>.

392. Tronvil P. Developing standards: Global standards for air cleaning equipment. *Filtration and Separation*. 2008. Vol. 45, no. 9. P. 28–31. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(08\)70369-0](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(08)70369-0).

393. Calvert S. Particle control by scrubbing. *Handbook of Air Pollution Technology*. Wiley, New York. 1984. P. 215-248.

394. Kessler E. On the continuity and distribution of water substance in atmospheric circulations. *Atmospheric Research*. 1995. Vol. 38, Issues 1–4. P. 109–145. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)00090-Z](https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)00090-Z).

395. Mircea M., Stefan S. A theoretical study of the microphysical parameterization of the scavenging coefficient as a function of precipitation type and rate. *Atmospheric Environment*. 1998. Vol. 32. P. 2931–2938. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00018-1).

396. Park S. H., Jung C. H., Jung K. R., Lee B. K., Lee K. W. Wet scrubbing of polydisperse aerosols by freely falling droplets. *Journal of Aerosol Science*. 2005. Vol. 36, Issue 12. P. 1444–1458. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.03.012>.

397. Lee K. W., Liu B. Y. H. (1980) On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 1980. Vol. 30:4. P. 377–381, <https://doi.org/10.1080/00022470.1980.10464592>.

398. Jung C. H., Kim Y. P., Lee K. W. Analytic solution for polydispersed aerosol dynamics by a wet removal process. *Journal of Aerosol Science*. 2002. Vol. 33, Issue 5. P. 753–767. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(01\)00209-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(01)00209-9).

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

#### **Монографії та розділи в монографіях**

1. Газоочистное оборудование для комплексной очистки газов / Л. Гурець, И. Козий, Д. Пляцук. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 64 с.

*Здобувачу належать розділи 3 та 4, що стосуються дослідженню гідродинаміки і пиловловлення в апаратах з провальними тарілками великих отворів, дослідження процесів абсорбції газових викидів на промислово-дослідних установках з провальними тарілками великих отворів, обробка статистичних даних і побудова регресійних моделей.*

2. Козій І. С., Пляцук Л. Д. Розробка програмного алгоритму вибору природозахисного обладнання. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022* : Колективна монографія. Полтава – Львів: НУШП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка» – Дніпро: Середняк Т. К. 2022. С. 313–325.

*Здобувачу належить інформація щодо розробки вихідних баз даних для розробки програмного алгоритму вибору природозахисного обладнання, логічний та математичний опис обліку параметрів забруднюючих речовин, умов середовища та параметрів технологічного обладнання.*

#### **Статті у фахових наукових виданнях із переліку МОН України**

3. Козій І. С., Гурець Л. Л. Дослідження пилових викидів виробництва двоокису титану. *Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки*. Суми, 2012. Вип. №4. С. 180–185.

*Здобувач провів паспортизацію пилу ільменіту та двоокису титану як фактора екологічної небезпеки з метою вибору відповідного пилоочисного обладнання та підвищення ефективності пилоочищення.*

4. Козій І. С., Гурець Л. Л., Бурдуній О. П. Моделювання розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері від стаціонарних джерел забруднення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків, 2012. Вип. №66 (972). С. 114–118.

*Здобувач розробив математичну модель розсіювання твердих частинок та її розв'язання методом кінцевих елементів з урахуванням дисперсності пилу, яка може бути використана для розрахунку концентрації дрібнодисперсного пилу на заданій відстані від джерела при певній швидкості вітру та заданій потужності джерела.*

5. Козій І. С., Макаренко Н. А. Определение кадмия в почве урбанизированных территорий и его влияние на здоровье человека. *Вісник Кременчуцького державного університету імені М. Остроградського.* Кременчук, 2012. Вип. №5 (76). С. 123–125.

*Здобувач виконав аналіз негативного впливу важких металів на організм людини на прикладі кадмію, провів екологічну оцінку ґрунтів за вмістом кадмію, розглянув проблему забруднення ґрунтового покриву міста як території з високим антропогенним навантаженням.*

6. Козій І. С., Вінниченко Н. О. Аналіз забруднення приземного шару атмосфери пилом рослинного походження. *Екологічна безпека.* Кременчук, 2013. Вип. №2 (16). С. 44–47.

*Здобувач провів аналіз існуючої інформації про властивості пилка, виявив масштаби впливу на навколишнє середовище забруднюючих речовин рослинного походження, запропонував організаційні й технологічні заходи щодо скорочення негативного впливу на здоров'я людини та навколишнє середовище.*

7. Козій І. С., Гурець Л. Л., Трунова І. О., Курбет Т. В. Аналіз гідродинамічних і пиловловлюючих характеристик апарату з провальними тарілками. *Вісник Житомирського державного технічного університету*. Житомир, 2013. Вип. №4 (67). С. 120–125.

*Здобувачу належать дослідження гідродинаміки апаратів з провальними тарілками великих отворів, дослідження процесу пилоочищення, що дозволили встановити залежність ефективності пилоочищення від конструктивних характеристик і режимів роботи.*

8. Hurets L., Kozii I., Miakaieva H. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of engineering sciences*. Sumy (Ukraine), 2017. Vol. №4, Issue 2. P. G12–G16.

*Здобувачу належать функціональні залежності ефективності екологічних процесів від кінетичних характеристик, механізмів формування міжфазної поверхні, розвитку рушійних сил та конструктивних особливостей природоохоронного обладнання.*

9. Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablieieva I., Kozii I., Balintova M. Sulfur Utilization in the Systems of Biological Wastewater Denitrification. *Journal of engineering sciences*. Sumy (Ukraine), 2018. Vol. №5, Issue 1. P. H7–H15.

*Здобувач сформував модель шляхів взаємодії асоціації гетеротрофних і автотрофних угруповань, описав енергетичні реакції синтезу автотрофної денітрифікації.*

10. Plyatsuk L., Chernysh Y., Roy I., Kozii I. Clarification of the Recent Scientific Approaches in Magnetic Water Treatment. *Journal of engineering sciences*. Sumy (Ukraine), 2019. Vol. №6, Issue 1. P. F12–F18.

*Здобувач сформував теоретичну модель комплексних механізмів впливу неоднорідного магнітного поля на молекули води та коливання молекул води в надмолекулярних утвореннях.*

11. Козій І. С., Пляцук Л. Д., Гурець Л. Л. Математичний опис гідродинаміки високоефективного пилогазоочисного апарату. *Збірник*

наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Миколаїв, 2021. Вип. №1 (484). С. 111–116.

*Здобувач отримав систему диференціальних та інтегрально-диференціальних рівнянь, які дозволяють описати процес укрупнення аерозольних частинок за рахунок конденсаційного та коагуляційного зростання, виконав розрахунок ефективності вловлення туманів та інших аерозолів в високоінтенсивному пилогазоочисному апараті.*

12. Козій І. С., Пляцук Л. Д., Гурець Л. Л., Трунова І. О. Врахування параметрів аерозольних викидів під час розробки технологічних рішень зменшення впливу на довкілля. *Техногенно-екологічна безпека*. Харків, 2021. Вип. №1 (9). С. 3–10.

*Здобувач провів уточнення існуючих класифікацій аерозолі з урахуванням найбільш вагомих фізико-хімічних характеристик таких як злипливість часток, гігроскопічність та здатність поглинати додаткові речовини із зовнішнього середовища, що є вагомим чинником під час вибору технологічних природоохоронних рішень.*

13. Козій І. С., Рой І. О., Яхненко О. М., Пономаренко Р. В., Щербак С. С. Математично-статистичне дослідження впливу дрібнодисперсних твердих забруднюючих речовин на здоров'я людини. *Техногенно-екологічна безпека*. Харків, 2021. Вип. №2 (10). С. 23–27.

*Здобувачем математично доведено негативний вплив дрібнодисперсного пилу в атмосферному повітрі на стан здоров'я людини, отримані коефіцієнти детермінації дозволяють стверджувати, що викиди дрібнодисперсного пилу є однією із головних причин розвитку хвороб системи кровообігу у людини.*

14. Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L., Volnenko A. A. Capturing Aerosol Particles in a Device with a Regular Pulsating Nozzle. *Journal of engineering sciences*. Sumy (Ukraine), 2021. Vol. №8, Issue 2. P. F1–F5.

*Здобувачем отримано аналітичні рішення для оцінки ефективності вловлювання полідисперсних аерозолів в апараті з регулярною пульсаційною насадкою за рахунок дифузійного та інерційного механізмів.*

15. Козій І. С., Жиленко Т. І., Трунова І. О., Батальцев Є. В., Макаренко Н. О. Критерії вибору природозахисного обладнання для очищення промислових викидів підприємств. *Екологічні науки*. Київ, 2021. Вип. №6 (39). С. 12–18.

*Здобувач за допомогою алгебри висловлень сформулював поступовість і наслідування роботи алгоритмічної програми розрахунку оптимального вибору природоохоронного обладнання на підставі параметрів забруднюючих речовин та умов середовища.*

16. Kozii I. Investigation of the influence of finely dispersed solid substances of the atmospheric air on humans. *Environmental problems*. Lviv (Ukraine), 2022. Vol. 7, No. 1. P. 7–13.

17. Козій І. С. Системний підхід до вибору природозахисного обладнання. *Техногенно-екологічна безпека*. Харків, 2022. Вип. №1 (11). С. 48–54.

18. Пляцук Л. Д., Козій І. С. Дослідження гідродинаміки високоефективного пилогазоочисного обладнання з регулярною пульсаційною насадкою. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. Івано-Франківськ, 2022. Вип. №1(25). С. 81–89.

*Здобувачу належить встановлення основних гідродинамічних режимів роботи та робочих діапазонів роботи апарата з регулярною пульсаційною насадкою та підтвердження того, що вихровий перебіг потоку та його відривний (пульсаційний) характер руху значною мірою сприяє інтенсифікації процесів укрупнення та осадження частинок забруднюючих речовин.*

**Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та  
виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та  
Web of Science**

19. Plyatsuk L., Hurets L., Kozii I., Vaskin R. Industrial research studies of gas treatment device with a large hole sieve trays. *Науковий вісник Національного*



гірничого університету. Дніпропетровськ, 2016. Вип. №3. С. 95–100. (**Scopus, Q3**)

Здобувач визначив ефективність очистки газу від пилу двоокису титану – 9,2 % і пилу ільменіту – 99,5 %, запропонував рекомендації відносно впровадження апарату з провальними тарілками великих отворів замість існуючого пиловловлюючого обладнання на трьох стадіях процесу виробництва двоокису титану: розмел ільменіту, прожарювання та розмел двоокису титану.

20. Roy I., Vaskina I., Vaskin R., Kozii I. Influence of the Magnetic Field Gradient on the Efficiency of Magnetic Water Treatment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. Cham: Springer, 2020. – Vol. 2. P. 387-395. (**Scopus, WoS**)

Здобувач встановив залежності між швидкістю водного розчину та геометрією неоднорідного магнітного поля, що є одними з основних параметрів, які визначають ефективність магнітного очищення.

21. Zhylenko T., Kozii I., Shuda I., Bozhenko V. Using a web application to realize the effect of AR in assessing the environmental impact of emissions source. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. P. 193–204. (**Scopus**)

Здобувач провів теоретичне обґрунтування процесу поширення забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери, розробив алгоритм та реалізував WEB-застосунок для розрахунку поширення забруднюючих речовин.

22. Kozii I., Plyatsuk L., Hurets L. Distribution of the Dispersed Phase in the Gas Cleaning Equipment with Pulsating Plug. *Problemele Energeticii Regionale*. 2021. Vol. №1 (49). P. 29–38. (**Scopus, WoS, Q4**)

Здобувачем отримано рівняння для визначення радіусу частинки в процесі конденсації парогазорідної системи, яке дозволяє визначити можливість уловлювання частинок за рахунок інерційного або турбулентно-дифузійного механізму в апараті з регулярною пульсаційною насадкою, отримано рівняння для розрахунку діаметра крапель рідини, що утворюються при дробленні рідинних потоків турбулізуючими елементами.

23. Chernysh Y., Chubur V., Fukui M., Kozii I., Roy I. Stimulation of Anaerobic Fermentation of Wastewater and Sewage Sludge. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. Cham: Springer, 2021. P. 319–328. **(Scopus, WoS)**

*Здобувач за допомогою програми VOSviewer здійснив візуалізацію мережевої системи шляхом стимуляції анаеробного бродіння стічних вод.*

24. Kozii I., Plyatsuk L., Koval V. Algorithm for Selection Equipment to Reduce the Technogenic Effect on the Environment. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. №1 (53). P. 58–66. **(Scopus, WoS, Q4)**

*Здобувач реалізував логічний та математичний опис одночасного обліку параметрів забруднюючих речовин, умов середовища та параметрів технологічного обладнання, унікальність розробленого алгоритму полягає в повторній перевірці відповідності кожного параметра обладнання умовам середовища і характеристикам забруднюючих речовин.*

25. Kozii I., Plyatsuk L., Zhylenko T., Hurets L., Bataltsev Y., Sayenkov D. Development of the Turbulent Diffusion Model of Fine Suspended Substances in the Lower Atmosphere Layer. *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*. 2022. Vol. 28, No. 4. P. 529–535. **(Scopus, WoS, Q3)**

*Здобувачу належить розробка алгоритму побудови математичної моделі розсіювання забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери, побудова програмного алгоритму розрахунку в середовищі PTC Mathcad Prime, пояснення графічних візуалізацій розрахунку математичної моделі.*

### ***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

26. Дослідження забруднення приземного шару атмосфери пилом рослинного походження / І. С. Козій, Н. О. Вінниченко. *Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 23–26 квітня 2013 р. Суми: СумДУ, 2013. С. 203.

27. Моніторинг стану земельних ресурсів м. Суми / І. С. Козій, Д. В. Сапченко. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії»*. 30–31 січня 2015 р. Переяслав-Хмельницький, 2015. С. 32–35.

28. Вимога сучасності – теплові насоси як елемент енерго- і ресурсозбереження / І. С. Козій, К. В. Лего. *Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 14–17 квітня 2015 р. Суми: СумДУ, 2015. С. 132–133.

29. Зниження техногенного навантаження на атмосферу підприємств хімічної промисловості / І. С. Козій, К. В. Лего. *Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 18–21 квітня 2017 р. Суми: СумДУ, 2017. С. 126.

30. Пилові викиди та їх вплив на здоров'я людини / І. С. Козій, К. В. Петроченко. *Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 18–21 квітня 2017 р. Суми: СумДУ, 2017. С. 130.

31. Сучасні шляхи поводження з твердими побутовими відходами / І. С. Козій, В. П. Яценко. *Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 16–19 квітня 2019 р. Суми: СумДУ, 2019. С. 226.

32. Зниження техногенного навантаження на довкілля підприємств харчової промисловості / І. С. Козій, П. В. Федоришин. *Матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 21–24 квітня 2020 р. Суми: СумДУ, 2020. С. 189–190.

33. Using a highly efficient gas cleaning equipment for reduction technogenic impact on the environment / I. С. Козій. *XXI Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки»*. 5–9 квітня 2021 р. Київ: НАУ, 2021. С. 125.

34. Вплив аерозольних викидів на довкілля / І. С. Козій, А. Ю. Вихрова. *Матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції. Сучасні технології у промисловому виробництві*. 20–23 квітня 2021 р. Суми: СумДУ, 2021. С. 189–190.

35. Технологічні рішення уловлювання викидів енергетичних підприємств / І. С. Козій. *I Міжнародна науково-теоретична конференція «Formation of innovative potential of world science»*. 07 травня 2021 р. Тель-Авів, ISR, 2021. С. 145–147.

36. Mathematical and statistical study of the influence of air pollutants on human / I. Roy, I. Kozii. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference* (Oxford, May 28, 2021). Oxford-Vinnitsia: P.C. Publishing House & European Scientific Platform. Vol. 1. P. 191–194.

37. Stimulation of Anaerobic Fermentation of Wastewater and Sewage Sludge / Y. Chernysh, V. Chubur, M. Fukui, I. Roy, I. Kozii. *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: Book of Abstracts of the 4th International Conference* (Lviv, June 8-11, 2021). Sumy: IATDI, 2021. P. 150.

38. Розробка моделі розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері / І. С. Козій. *Матеріали IX Міжнародної наукової конференції молодих вчених: Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування*. 25–26 листопада 2021 р. Харків: ХНУ ім. Каразіна, 2021. – С. 81–83.

39. Розробка моделі синтезу обґрунтованого вибору природоохоронного обладнання / І. С. Козій, Т. І. Жиленко. *Матеріали IX Всеукраїнської науково-*

*технічної конференції. Сучасні технології у промисловому виробництві.* 19–22 квітня 2022 р. Суми: СумДУ, 2022. С. 136–137.

40. Математичне обґрунтування вибору ефективних технологічних рішень для зменшення впливу на довкілля / І. С. Козій. *Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022».* 26–27 травня 2022 р. Полтава – Львів. Полтава: НУПП, 2022. С. 302–304.

41. Опис конструкцій високоефективного обладнання з регулярною пульсаційною насадкою / І. С. Козій. *Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку».* 07 липня 2022 р. Любляна (Словенія): ГО «ВАДНД», 2022. С. 467–472.

42. Системний аналіз для зниження техногенного навантаження на довкілля пилових викидів і забезпечення цілей сталого розвитку / І. С. Козій. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Сталий розвиток країни в рамках європейської інтеграції».* 30 листопада 2022 р. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2022. С. 57.

***Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації***

43. Локальні моделі прогнозування стану екологічного простору: навчальний посібник / О. О. Рибалов, С. В. Сидоренко, І. С. Козій. Суми: Сумський державний університет, 2012. 154 с.

*Здобувачу належить розділ 2, що стосується узагальнення наявних теоретичних відомостей існуючих методик побудови моделей забруднення атмосферного повітря, розробка програми в середовищі C++ для розрахунку дальності поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.*

44. Спеціальне обладнання та процеси неорганічної хімії : підручник / за ред. Л. Д. Пляцука, І. С. Козія. Суми : Університетська книга, 2022. 390 с.

*Здобувачу належить розділ 12, що стосується створення безпечних виробництв (захист навколишнього середовища, розробка безвідходних і маловідходних виробництв, забезпечення безаварійної експлуатації), загальне редагування змісту матеріалу, макету та дизайну.*

## Додаток Б

Прилади, що використовувались при дослідженні гідродинаміки та  
пилловловлення в апаратах з РПН

<b>№ п/п</b>	<b>Назва ЗВТ</b>	<b>Заводський номер</b>	<b>Відомості про повірку</b>
1	Мікроманометр ММЦ-200	222	Свідоцтво №39-03-2355 від 03.12.20
2	Напірна трубка ТН- 0,7( $K_T=0,576$ )	2033	Тавро, 4 кв. 2020
3	Напірна трубка ТН- 1,0( $K_T=0,551$ )	10	Тавро, 4 кв. 2020
4	Напірна трубка ТН- 1,5( $K_T=0,551$ )	5	Тавро, 4 кв. 2020
5	Напірна трубка ТН- 2,0( $K_T=0,546$ )	35	Тавро, 4 кв. 2020
6	Вимірювач температури ИТ-1	39	Свідоцтво №561 від 27.03.2020
7	Вимірювач температури ИТ-1	266	Свідоцтво №2152 від 23.12.2020
8	Вимірювач швидкості ИС-1	145	Свідоцтво №22- 00/0806551 від 11.12.20
9	Термометр цифровий "Testo"	33	Свідоцтво № 2151 від 23.12.2020
10	Мановакууметр МЦ-1Д-10	47	Свідоцтво №39-03-2395 від 11.12.2020
11	Мановакууметр МЦ-1Д	44	Свідоцтво №39-03-2394 від 11.12.2020
12	Рулетка Р5УЗК	1	Тавро, I кв. 2020
13	Штангенциркуль ШЦ	3008720	Тавро, I кв. 2020
14	Секундомір СОСпр-26-2- 000	8507	Свідоцтво № 253 від 23.03.2020
15	Барометр-анероїд БАММ-1	11272	Свідоцтво № 0535 від 25.03.2020

## Додаток В

Програмний алгоритм розрахунку побудови візуалізацій для розв'язку функції розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин в програмному середовищі PTC Mathcad Prime 7 (© PTC Inc. (PTC), 2021)

```

> restart;
> #Текстовий приклад для одномірної задачі перенесення
> V(x, t) := (1 + av·sin(bv·x + cv))·(1 + dv·sin(rv·t + gv));
      V := (x, t) ↦ (1 + av·sin(bv·x + cv))·(1 + dv·sin(rv·t + gv)) (1)
> K(x, t) := (1 + ak·sin(bk·x + ck))·(1 + dk·cos(rk·t + gk));
      K := (x, t) ↦ (1 + ak·sin(bk·x + ck))·(1 + dk·cos(rk·t + gk)) (2)
> q(x, t) := (1 + aq·cos(bq·x + cq))·(1 + dq·cos(rq·t + gq));
      q := (x, t) ↦ (1 + aq·cos(bq·x + cq))·(1 + dq·cos(rq·t + gq)) (3)
> P1 := diff(q(x, t), t); P2 := q(x, t); P3 := diff(V(x, t)·q(x, t), x);
      P1 := -(1 + aq cos(bq x + cq)) dq rq sin(rq t + gq)
      P2 := (1 + aq cos(bq x + cq)) (1 + dq cos(rq t + gq))
P3 := av bv cos(bv x + cv) (1 + dv sin(rv t + gv)) (1 + aq cos(bq x + cq)) (1 + dq cos(rq t
      + gq)) - (1 + av sin(bv x + cv)) (1 + dv sin(rv t + gv)) aq bq sin(bq x + cq) (1
      + dq cos(rq t + gq)) (4)
> P4 := diff(K(x, t)·diff(q(x, t), x), x);
P4 := -ak bk cos(bk x + ck) (1 + dk cos(rk t + gk)) aq bq sin(bq x + cq) (1 + dq cos(rq t
      + gq)) - (1 + ak sin(bk x + ck)) (1 + dk cos(rk t + gk)) aq bq2 cos(bq x + cq) (1
      + dq cos(rq t + gq)) (5)
> α := 0.1; β := 0.1; θ := 0.001; ξ := 1; T := 10; Smax := 0.0001; qmax := 0.001;
      α := 0.1
      β := 0.1
      θ := 0.001
      ξ := 1
      T := 10
      Smax := 0.0001
      qmax := 0.001 (6)
> Q(x, t) := P1 + α·P2 + β·P3 - θ·P4; S(x, t) :=  $\frac{Q(x, t) \cdot qmax}{Smax \cdot T}$ ;
      Q := (x, t) ↦ α·P2 + β·P3 - θ·P4 + P1
      S := (x, t) ↦  $\frac{Q(x, t) \cdot qmax}{Smax \cdot T}$  (7)

```



```

> #Коефіцієнти для швидкості вітру
> av := 0.8 ; bv := 7 ; cv := 1.5 ; dv := 0.75 ; rv := 2 ; gv := 1.5 ;
    av := 0.8
    bv := 7
    cv := 1.5
    dv := 0.75
    rv := 2
    gv := 1.5

```

(8)

```

> #Коефіцієнти для турбулентної дифузії
> ak := 0.75 ; bk := 7 ; ck := 3 ; dk := 0.75 ; rk := 7 ; gk := 3 ;
    ak := 0.75
    bk := 7
    ck := 3
    dk := 0.75
    rk := 7
    gk := 3

```

(9)

```

> #Коефіцієнти для концентрації забруднюючої речовини
> aq := 0.075 ; bq := -5 ; cq := 5 ; dq := -1 ; rq := 2.75 ; gq := 0.1 ;
    aq := 0.075
    bq := -5
    cq := 5
    dq := -1
    rq := 2.75
    gq := 0.1

```

(10)

```

> Q(x, t) := -(1 + aq*cos(bq*x + cq)) * dq*sin(rq*t + gq) * rq + alpha * ((1 + aq*cos(bq*x + cq))
    * (1 + dq*cos(rq*t + gq))) + beta * (av*cos(bv*x + cv) * bv * (1 + dv*sin(rv*t + gv)) * (1 + aq
    * cos(bq*x + cq)) * (1 + dq*cos(rq*t + gq))) - (1 + av*sin(bv*x + cv)) * (1 + dv*sin(rv*t
    + gv)) * aq * sin(bq*x + cq) * bq * (1 + dq*cos(rq*t + gq))) - theta * (-ak*cos(bk*x + ck) * bk
    * (1 + dk*cos(rk*t + gk)) * aq * sin(bq*x + cq) * bq * (1 + dq*cos(rq*t + gq))) - (1 + ak
    * sin(bk*x + ck)) * (1 + dk*cos(rk*t + gk)) * aq * cos(bq*x + cq) * bq^2 * (1 + dq*cos(rq*t
    + gq))) ;
Q := (x, t) ↦ -(1 + aq*cos(bq*x + cq)) * dq*sin(rq*t + gq) * rq + alpha * (1 + aq*cos(bq*x
    + cq)) * (1 + dq*cos(rq*t + gq)) + beta * (av*cos(bv*x + cv) * bv * (1 + dv*sin(rv*t + gv))
    * (1 + aq*cos(bq*x + cq)) * (1 + dq*cos(rq*t + gq))) - (1 + av*sin(bv*x + cv)) * (1 + dv
    * sin(rv*t + gv)) * aq * sin(bq*x + cq) * bq * (1 + dq*cos(rq*t + gq))) - theta * (-ak*cos(bk*x
    + ck) * bk * (1 + dk*cos(rk*t + gk)) * aq * sin(bq*x + cq) * bq * (1 + dq*cos(rq*t + gq))) - (1
    + ak * sin(bk*x + ck)) * (1 + dk*cos(rk*t + gk)) * aq * cos(bq*x + cq) * bq^2 * (1 + dq*cos(rq*t
    + gq)))

```

(11)

```

> S(x, t) :=  $\frac{q_{max}}{S_{max} \cdot T} \cdot (2.75 \cdot (1 + 0.075 \cdot \cos(5 \cdot x - 5)) \cdot \sin(2.75 \cdot t + 0.1) + 0.1 \cdot (1 + 0.075$ 
     $\cdot \cos(5 \cdot x - 5)) \cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t + 0.1)) + 0.56 \cdot \cos(7 \cdot x + 1.5) \cdot (1 + 0.75 \cdot \sin(2 \cdot t$ 
     $+ 1.5)) \cdot (1 + 0.075 \cdot \cos(5 \cdot x - 5)) \cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t + 0.1)) - 0.0375 \cdot (1 + 0.8 \cdot \sin(7 \cdot x$ 
     $+ 1.5)) \cdot (1 + 0.75 \cdot \sin(2 \cdot t + 1.5)) \cdot \sin(5 \cdot x - 5) \cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t + 0.1)) + 0.00196875$ 
     $\cdot \cos(7 \cdot x + 3) \cdot (1 + 0.75 \cdot \cos(7 \cdot t + 3)) \cdot \sin(5 \cdot x - 5) \cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t + 0.1))$ 
     $+ 0.001875 \cdot (1 + 0.75 \cdot \sin(7 \cdot x + 3)) \cdot (1 + 0.75 \cdot \cos(7 \cdot t + 3)) \cdot \cos(5 \cdot x - 5) \cdot (1$ 
     $- \cos(2.75 \cdot t + 0.1))$ );

S := (x, t)  $\mapsto \frac{1}{S_{max} \cdot T} (q_{max} \cdot (2.75 \cdot (1 + 0.075 \cdot \cos(5 \cdot x - 5)) \cdot \sin(2.75 \cdot t + 0.1) + 0.1 \cdot (1$  (12)
     $+ 0.075 \cdot \cos(5 \cdot x - 5)) \cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t + 0.1)) + 0.56 \cdot \cos(7 \cdot x + 1.5) \cdot (1 + 0.75 \cdot \sin(2$ 
     $\cdot t + 1.5)) \cdot (1 + 0.075 \cdot \cos(5 \cdot x - 5)) \cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t + 0.1)) + (-1) \cdot 0.0375 \cdot (1 + 0.8$ 
     $\cdot \sin(7 \cdot x + 1.5)) \cdot (1 + 0.75 \cdot \sin(2 \cdot t + 1.5)) \cdot \sin(5 \cdot x - 5) \cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t + 0.1))$ 
     $+ 0.00196875 \cdot \cos(7 \cdot x + 3) \cdot (1 + 0.75 \cdot \cos(7 \cdot t + 3)) \cdot \sin(5 \cdot x - 5) \cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t$ 
     $+ 0.1)) + 0.001875 \cdot (1 + 0.75 \cdot \sin(7 \cdot x + 3)) \cdot (1 + 0.75 \cdot \cos(7 \cdot t + 3)) \cdot \cos(5 \cdot x - 5)$ 
     $\cdot (1 - \cos(2.75 \cdot t + 0.1)))$ );

> with(plots);
[animate, animate3d, animatecurve, arrow, changecoords, complexplot, complexplot3d, (13)
  conformal, conformal3d, contourplot, contourplot3d, coordplot, coordplot3d, densityplot,
  display, dualaxisplot, fieldplot, fieldplot3d, gradplot, gradplot3d, implicitplot,
  implicitplot3d, inequal, interactive, interactiveparams, intersectplot, listcontplot,
  listcontplot3d, listdensityplot, listplot, listplot3d, loglogplot, logplot, matrixplot, multiple,
  odeplot, pareto, plotcompare, pointplot, pointplot3d, polarplot, polygonplot, polygonplot3d,
  polyhedra_supported, polyhedraplot, rootlocus, semilogplot, setcolors, setoptions,
  setoptions3d, shadebetween, spacecurve, sparsematrixplot, surfdata, textplot, textplot3d,
  tubeplot]

> plot3d(P1(x, t), x=0..1, t=0..1, color=navy, labels=["x", "t", "P1"]);
> plot3d( $\alpha \cdot P2(x, t)$ , x=0..1, t=0..1, color=navy, labels=["x", "t", " $\alpha \cdot P2$ "]);
> plot3d( $\beta \cdot P3(x, t)$ , x=0..1, t=0..1, color=navy, labels=["x", "t", " $\beta \cdot P3$ "]);
> plot3d( $\theta \cdot P4(x, t)$ , x=0..1, t=0..1, color=navy, labels=["x", "t", " $\theta \cdot P4$ "]);
> plot3d(S(x, t), x=0..1, t=0..1, color=navy, labels=["x", "t", "S"]);
> plot3d(V(x, t), x=0..1, t=0..1, color=navy, labels=["x", "t", "V"]);
> plot3d(K(x, t), x=0..1, t=0..1, color=navy, labels=["x", "t", "K"]);
> plot3d(q(x, t), x=0..1, t=0..1, color=navy, labels=["x", "t", "q"]);
>

```

## Додаток Г

Форма затверджена наказом  
Міністерства екології та природних  
ресурсів України  
19 квітня 2013 року № 179

Додаток 1 до Акта відбору проб від 12.06.21 № 12-09

**ПРОТОКОЛ**  
**вимірювань параметрів газопилового потоку**  
**(при використанні вимірювача швидкості і вимірювань тиску в мм рт. ст.)**

Дата виконання вимірювань 12 червня 2021 року.

Час виконання вимірювань: початок 12 год. 30 хв., закінчення 15 год. 20 хв.

Вимірювання виконані відповідно до ГОСТ 17.2.4.06-90 та 17.2.4.07-90.

1. Номер (назва) джерела Лабораторний стенд

2. Місце вимірювання газохід

2.1. До (після) вентилятора; до (після) ГОУ; ділянка газоходу: вертикальна, горизонтальна, похила.

2.2. Довжина прямої ділянки  $l$ , мм 3000.

2.3. Вимірювальний переріз – круглий

Круглий переріз	
Діаметр $D$ , мм	<u>310, 310, 310, 310</u>
$D = 310$ .	
Значення $L = l / D = 3000 / 310 = 9,6774$ .	
Довжина ділянки до вимірювального перерізу $l_y$ , мм	$l_y = l - (K_z \times D)$
$l_y = 3000 - (3,3 \times 310) = 1977$	
Кількість точок вимірювань $n_D$ , шт.	$n_D = 1$ .
Площа перерізу $S_D$ , м <sup>2</sup> . $S_D = 0,785 (\bar{D} / 1000)^2$	
$S_D = 0,785 \times (310 / 1000)^2$	

$$S_D = 0,0754$$

3. Температура газопилового потоку  $t_r$ ; °С;  $T_r$ ; К

Круглий переріз				
Координати точки, мм	$t_{r1}$	$t_{r2}$	$t_{r3}$	$\bar{t}_r$
т. 1 (0,250 ± 0,083) $\bar{D}$ $0,25 \times 310 = 78$	25	25	25	25
т. 2 $\bar{D} - (0,250 \pm 0,083) \bar{D}$ $310 - 78 = 232$	25	25	25	25

$$\bar{t}_r = 25; \quad T_r = (273 + \bar{t}_r)$$

$$T_r = 298$$

4. Атмосферний тиск  $p_a$ , мм рт. ст.

Напочатку	Наприкінці
752	752

$$\bar{p}_a = 752$$

## Продовження додатку Г

## 5. ЗВТ, що застосовувались при вимірюванні

Назва ЗВТ	Заводський номер	Відомості про повірку
Вимірювач швидкості ІС-1	242	Свідоцтво №22-00/0806551 від 11.12.2020
Напірна трубка ТН-0,7 (Кт=0,576)	2033	Тавро, 4 кв. 2020
Барометр-анероїд БАММ-1	11272	Свідоцтво № 0535 від 25.03.2020
Мікроманометр ММЦ-200	222	Свідоцтво №39-03-2355 від 03.12.2020
Вимірювач температури ІТ-1	266	Свідоцтво №2152 від 23.12.2020
Рулетка Р5УЗК	1	Тавро, 1 кв. 2020
Штангенциркуль ШЦ	3008720	Тавро, 1 кв. 2020

6. Швидкість  $v$  і об'ємна витрата  $q_v$ 

Координати точки $n_i$ , мм			Швидкість $v_i$ , м/с				Тиск статичний $p_{ст i}$ , мм вод. ст.								
$n_i$	$K_{Di},$ $K_{n_{Ai}}$ $K_{n_{Bi}}$	$K_{Di} \times \bar{D};$ $K_{n_{Ai}} \times A,$ $K_{n_{Bi}} \times B$	показ ЗВТ				мікроманометр ММН-2400				манометр				
			$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v}_i$	$\beta=1$			$p_{ст i} =$ $= \bar{p} \times \beta$	показ ЗВТ			$\bar{p}_{ст i}$	
							$p_1$	$p_2$	$p_3$		$\bar{p}$	$p_{ст 1}$	$p_{ст 2}$		$p_{ст 3}$
1			3,34	3,38	3,36	3,36	1	1,1	1,1	1,07	1,07	1,1	1,2	1,2	1,17
2			3,42	3,41	3,47	3,44	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,2	1,3	1,2	1,23
3			3,46	3,51	3,47	3,48	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	1,2	1,3	1,3	1,27
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															

$$\bar{v} = 1,14$$

$$\bar{p}_{ст} = -0,011 \text{ мм рт. ст.}$$

$$p_r = (p_a \pm \bar{p}_{ст}) = 752 - 0,011$$

$$p_r = 751,99$$

$$p_r / T_r = 751,99 / 298$$

$$p_r / T_r = 2,523$$

Об'ємна витрата  $q_v$  та  $q_{vo}$ , м<sup>3</sup>/с.

При робочих умовах  $q_v = \bar{v} \cdot S = 1,14 \times 0,0789 = 0,09$

Зведена до нормальних умов  $0,359 \cdot q_v \times p_r / T_r = 0,359 \times 0,09 \times 2,523$

$$q_{vo} = 0,082$$

7. Температура навколишнього середовища біля місця відбору проб,  $t_{нс} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Примітка. \_\_\_\_\_

Вимірювання виконали \_\_\_\_\_

Кирилова Т.І.

Подлущкий О.О.

Представник підприємства \_\_\_\_\_

Козій І.С.

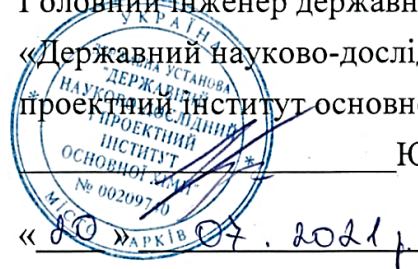
## Додаток Д

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер державної установи

«Державний науково-дослідний і  
проектний інститут основної хімії»

Ю. М. Кузенко



## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

**«НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО  
ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД  
ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ НА ДОВКІЛЛЯ»**

докторанта Козія Івана Сергійовича

Ми, що нижче підписалися від Сумського державного університету: докторант кафедри екології та природозахисних технологій, к.т.н., доцент Козій І. С.; завідувач кафедри екології та природозахисних технологій, д.т.н., професор Пляцук Л. Д. та від державної установи «Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії» начальник науково-технічного відділу, д.т.н., професор Панасенко В.О. цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Козія Івана Сергійовича «Науково-теоретичні основи системного підходу до зниження техногенного навантаження від промислових викидів на довкілля», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук передані для використання у розробці техніко-комерційних пропозицій та проектування «мокрого» очищення газів від аерозолів (туману, пилу, диму та інше) в апаратах з регулярною пульсаційною насадкою в режимі розвинутої турбулентності, а саме:

1. Результати дослідження процесів гідродинаміки та математичний опис конденсаційного та коагуляційного механізмів укрупнення аерозольних часток в робочій зоні апаратів з регулярною пульсаційною насадкою.

2. Рекомендовані режимно-технологічні параметри роботи пилогазоочисного обладнання з регулярною пульсаційною насадкою.

3. Опис принципів схем експериментальних установок, та запропонованого технологічного обладнання.



4. На основі аналізу експериментальних результатів встановлено, що:

– отримані Козієм Іваном Сергійовичем залежності дають змогу розрахувати конструктивні та технологічні характеристики пилогазоочисного обладнання з регулярною пульсаційною насадкою, які працюють в режимі розвинутої турбулентності;

– показано, що розроблені конструкції «мокрого» пилогазоочисного обладнання мають достатньо низьку серед аналогів витрату рідини і широкий діапазон стійкої роботи за швидкістю газу, що дозволить ефективно використовувати його у природоохоронній діяльності;

– в результаті застосування запропонованого способу інтенсифікації роботи діючого пилогазоочисного обладнання без масштабних реконструкційних робіт технологічних ліній буде забезпечено додатковий економічний ефект за рахунок ресурсо- та енергозбереження, а також досягнуто спрощення конструктивного оформлення технологічних установок.

5. Результати дисертаційної роботи Козія Івана Сергійовича приймаються державною установою «Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії» для використання у якості техніко-комерційних пропозицій та для проектування нового технологічного природоохоронного обладнання.

Від державної установи «Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії»

Начальник науково-технічного відділу  
д.т.н., професор



В. О. Панасенко

Від Сумського державного університету

Докторант кафедри екології та  
природозахисних технологій, к.т.н., доцент



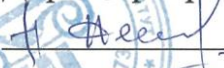
І. С. Козій


Завідувач кафедри екології та  
природозахисних технологій, д.т.н., професор



Л. Д. Пляцук

## Додаток Е

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Директор ПрАТ інститут «Сумипроєкт»  
 Павловський В. Г.  
 «30» \_\_\_\_\_ 2022 р.



## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи  
 Козія Івана Сергійовича для використання в процесі проектування  
 промислових підприємств

Цим актом стверджується, що Козій І. С. передано у ПрАТ інститут «Сумипроєкт» результати його дисертаційної роботи «Наукові основи системного підходу до зниження техногенного навантаження від промислових викидів на довкілля» щодо вибору пилогазоочисного обладнання промислових підприємств. Зміст переданих матеріалів у повній мірі відображає методологію вибору пилогазоочисного обладнання та порядок розрахунку ефективності роботи апаратів з регулярною пульсаційною насадкою для вловлення дрібнодисперсних зважених речовин. Матеріали дисертації будуть використані для вибору та розрахунку пилогазоочисного обладнання промислових підприємств.

Від ПрАТ інститут «Сумипроєкт»

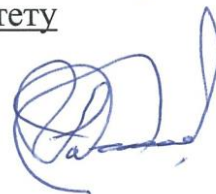
Директор по проектній діяльності



Л. Л. Тихонкова

Від Сумського державного університету

Завідувач кафедри ЕПзТ  
 д.т.н., професор



Л. Д. Пляцук

Доцент кафедри ЕПзТ  
 к.т.н., доцент



І. С. Козій

## Додаток Є

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Заст. директора з наукових питань  
 СП «Технополіс»   
 \_\_\_\_\_ О. С. Шевченко  
 «13» \_\_\_\_\_ 2022 р.

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи Козія Івана Сергійовича  
 «Наукові основи системного підходу до зниження техногенного  
 навантаження від промислових викидів на довкілля»  
 для підвищення ефективності пилогазоочищення у виробництві пігментного  
 двоокису титану

У відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету розроблено конструкцію і рекомендації до експлуатації пилогазоочисного апарату з розвинутим турбулентним шаром для мокрого очищення відхідних газів. Дослідно-промислові дослідження проводились на відхідних газах, які містили пил двоокису титану.

Зміст переданих матеріалів у повній мірі відображає дані дослідно-промислових випробувань, на основі яких розроблені рекомендації з проектування та експлуатації апарата.

Отримані результати будуть використані для розробки та проектування пилогазоочисного обладнання у виробництві пігментного двоокису титану.

Від СП «Технополіс»

Директор по проектній діяльності



В. І. Овсяник

Від Сумського державного університету

Завідувач кафедри ЕПзТ  
 д.т.н., професор



Л. Д. Пляцук

Доцент кафедри ЕПзТ  
 к.т.н., доцент



І. С. Козій



## Додаток Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника Державної  
 екологічної інспекції у Сумській області –  
 заступник Головного державного  
 інспектора з охорони навколишнього  
 природного середовища Сумської області

Олександр УВАРОВ



2022 р.

## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
 Козія Івана Сергійовича  
 на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
 за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека

Ми, що нижче підписалися, заступник начальника Державної екологічної інспекції у Сумській області – заступник Головного державного інспектора з охорони навколишнього природного середовища Сумської області Уваров О. М., заступник начальника відділу – старший державний інспектор з охорони навколишнього природного середовища Сумської області Литвин В. М., завідувач кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету д.т.н., професор Пляцук Л. Д., докторант, доцент кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету, к.т.н., доцент Козій І. С., склали цей акт про те, що під час розроблення проєктної документації використані рекомендації щодо прогнозування та розрахунку зони забруднення атмосферного повітря викидами дрібнодисперсних зважених речовин, що забезпечує адекватну оцінку потенційних збитків внаслідок забруднення ґрунту чи поверхневих вод забруднюючими речовинами.

Отримані результати становлять практичну цінність для оцінки промислових викидів дрібнодисперсних зважених речовин. Дослідження показали, що запропонована математична модель дозволяє спрогнозувати формування рівня забруднення атмосферного повітря та оцінити розміри зони впливу викидів дрібнодисперсних зважених речовин від промислових виробництв. Запропонована модель ґрунтується на основі тривимірного рівняння розподілу домішок у турбулентному середовищі з урахуванням параметрів джерел викидів, сили та напрямку вітру, турбулентності повітряних мас.

Розрахунок зони впливу викидів промислових виробництв у математичному середовищі Maple займає 30–40 хвилин для кожної нової початкової умови, що є перевагою моделі. Модель має широкий діапазон вхідних даних для швидкості вітру та атмосферної турбулентності, в межах яких результати є адекватними. Аналіз візуалізації розрахунків показує ефективність прийнятої моделі на відстанях забруднення до 5 км з урахуванням різних вихідних параметрів джерел викидів та умов розподілу домішок.

Розроблена математична модель буде використана для прогнозування техногенного навантаження на навколишнє середовище та для оперативного вирішення екологічних проблем.

Від Державної екологічної інспекції у Сумській області

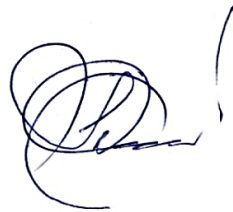
Заступник начальника відділу – старший державний інспектор з охорони навколишнього природного середовища Сумської області



Віталій ЛИТВИН

Від Сумського державного університету

Завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій д-р техн. наук, проф.



Леонід ПЛЯЦУК

Виконавець:  
Докторант, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій канд. техн. наук, доц.



Іван КОЗІЙ



## Додаток 3

ЗАТВЕРЖДУЮ

Перший проректор

Сумського державного університету



Сергій ЛЕОНОВ

09 2022 р.

## АКТ

про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи  
Козія Івана Сергійовича на тему «Наукові основи системного підходу до  
зниження техногенного навантаження від промислових викидів на довкілля»

Основні положення та результати дисертаційного дослідження Козія Івана Сергійовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека впроваджені у навчальний процес та застосовуються під час викладання дисциплін «Технології захисту навколишнього середовища», «Техноекологія», «Моделювання та прогнозування стану довкілля» та «Процеси і апарати природоохоронних технологій» для студентів спеціальностей 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища» та «Сучасні методи захисту довкілля». Зокрема, у навчальному процесі впроваджено запропоновані Іваном Козієм:

- методичні положення системного підходу щодо оцінювання впливу аерозольних викидів промислових підприємств на довкілля та екологічно безпечного поводження з ними;
- математичну модель з чисельним алгоритмом та програмним забезпеченням для прогнозування розподілу забруднюючих речовин в атмосфері;
- системний підхід до вибору пилогазоочистного обладнання, який ґрунтується на методі синтезу раціональної технології на підставі аналізу баз даних забруднюючих речовин, технологічних умов середовища та пилогазоочистного обладнання;
- науково-методичний підхід до фізичного та математичного моделювання процесу очищення промислових викидів від дрібнодисперсних зважених речовин в апаратах з розвинутою турбулентністю.

Завідувач кафедри екології  
та природозахисних технологій  
д-р техн. наук, проф.

Леонід ПЛЯЦУК

Професор кафедри екології  
та природозахисних технологій  
д-р техн. наук, проф.

Лариса ГУРЕЦЬ

Доцент кафедри екології  
та природозахисних технологій  
д-р техн. наук, доц.

Слізавета ЧЕРНИШ