

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КОЗІЙ ІВАН СЕРГІЙОВИЧ



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

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

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Суми – 2023

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі екології та природоохоронних технологій Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Пляцук Леонід Дмитрович,
Сумський державний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Петрушка Ігор Михайлович,
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри
екологічної безпеки та природоохоронної діяльності;

доктор технічних наук, професор
Внукова Наталія Володимирівна,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри екології;

доктор технічних наук, доцент
Кондратенко Олександр Миколайович,
Національний університет цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій, доцент
кафедри прикладної механіки та технологій захисту
навколишнього середовища.

Захист дисертації відбудеться 17 травня 2023 року об 11-й год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд. 204.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 за електронною адресою: <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/permanent-specialized-council/102-55-051-04.html>.

Реферат розісланий 12 квітня 2023 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04



О. О. Ляпощенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 легкозліпливих, так і смолистих речовин, що знижує ефективність наявних систем пилоочищення. Особливе місце серед забруднювачів займає дрібнодисперсний пи́л, 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 виконати 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 довір'я;
- 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 методикау 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 (дискова 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 методикау UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) та параметризовану оптимізацію. Розроблення програмного алгоритму вибору обладнання реалізоване в середовищі Google-Таблиці за методом послідовної ієрархічної кластеризації (ПК). 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 природоохоронних 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 природоохоронного 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

високоєфективного 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 наукових праць дисертанта, наведеному в рефераті.

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, з яких основний текст – 235 сторінок, робота містить 70 рисунків та 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтовано необхідність проведення наукових досліджень та їхню актуальність з огляду на сучасний стан проблеми підвищення рівня екологічної безпеки. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано мету й завдання досліджень, які були виконані для їх досягнення. На підставі цього визначено об'єкт і предмет досліджень. Наведено методи досліджень, використані в дисертації, сформульовано нові наукові результати, визначено практичне значення одержаних результатів і відомості про впровадження результатів досліджень, особистий внесок автора, апробацію поданих пропозицій, повноту викладу матеріалів у публікаціях та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела та визначено основні напрямки зниження техногенного навантаження від промислових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини. Осадження забруднюючих речовин із пилогазових викидів промислових підприємств призводить до забруднення ґрунту та міграції важких металів у підземні і поверхневі води, тобто є ключовим фактором формування екологічної безпеки. Актуальність теми дослідження підтверджується аналізом бази даних Scopus за напрямком досліджень – викиди аерозолів у теплоенергетиці та хімічній промисловості, який свідчить про те, що кількість наукових публікацій збільшилась у два рази за останні 10 років.

Аналіз бази даних Організації економічного співробітництва та розвитку (OECD) щодо викидів дрібнодисперсних частинок $PM_{2.5}$ в Україні за основними джерелами утворення наведено на рисунку 1.

Зниження техногенного навантаження від пилових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, передбачає використання комплексного підходу до проблем охорони довкілля та здоров'я населення. Унаслідок аналізу відповідності законодавчої бази України вимогам Європейського Союзу щодо охорони атмосферного повітря доведено необхідність проведення системної роботи зі створення й вдосконалення 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.

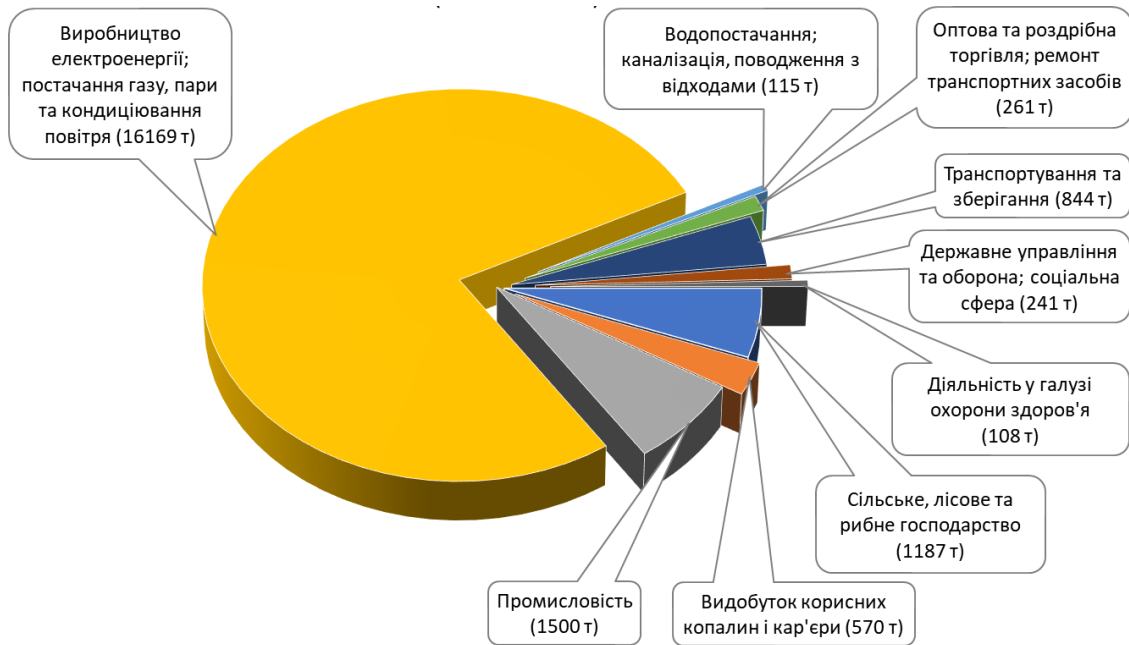


Рисунок 1 – Викиди $PM_{2.5}$ за основними видами діяльності в Україні

Ефективне управління екологічною безпекою можливе лише на основі моніторингу, об'єктивно наявного в будь-якому регіоні, із застосуванням відповідних заходів щодо зменшення до мінімуму негативного впливу джерел небезпеки. Запропоновано методіку ефективного вирішення проблеми забруднення атмосферного повітря на основі аналізу поточного сценарію забруднення повітря, наявних недоліків та ймовірного їх усунення (рис. 2.).



Рисунок 2 – Схема методологічного процесу ефективного управління якістю повітря

Для розуміння напрямків зниження негативного впливу аерозольних викидів на довкілля та раціонального вибору ефективного пилогазоочисного обладнання було проведено класифікацію аерозолів з її уточненням. Зокрема, було розглянуто найбільш вагомі фізико-хімічні характеристики як злипливість частинок, гігроскопічність та здатність сорбувати додаткові речовини із зовнішнього середовища, що також є вагомим фактором під час вибору технологічних природоохоронних рішень.

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.; у разі тривалого впливу – хронічних бронхітів, алергії, закупорення судин, зниження рівня й тривалості життя. Аналіз екологічних ризиків від забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом корелюється з показниками здоров'я населення: втратою років життя на 1 000 осіб населення країни внаслідок хвороби, інвалідності та передчасної смертності (DALY) та відсотком передчасних смертей, пов'язаних із викидами зважених речовин в атмосферу. Україна має позитивну динаміку передчасної смертності населення порівняно із загальною картиною, пов'язаною із забрудненням атмосферного повітря дрібнодисперсними частинками в різних країнах світу.

За даними OECD з використанням убудованих функцій програмного продукту MS Excel отримано прогнозну модель викидів дрібнодисперсних зважених речовин ($PM_{2.5}$ і менше) в Україні до 2030 року (рис. 3).



Рисунок 3 – Прогноз викидів дрібнодисперсних зважених речовин в Україні

За прогнозованим сценарієм (ураховували чотири 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, але не все залежить від обсягів викидів. Тому підвищення рівня екологічної безпеки від промислових викидів

PM_{2.5} передбачає комплексний підхід до проблем охорони довкілля та здоров'я людей.

Проведений літературний огляд літератури свідчить про те, що доцільність та ефективність природоохоронних заходів залежать від якості інформації про стан довкілля, яка може бути підготовлена під час моделювання й прогнозування процесів поширення забруднюючих речовин від потенційно-небезпечних об'єктів. Аргументовано проведення дослідження, присвяченого розробці математичної моделі перенесення забруднюючих речовин в атмосфері на основі чисельного моделювання.

Для зниження техногенного навантаження на довкілля від викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, потрібна високоефективна пилогазоочисна апаратура з великою питомою продуктивністю. Аналіз способів інтенсифікації інерційно-дифузійних процесів, що є основою технологій «мокрого» очищення газів від зважених речовин, приводить до напрямку проведення цих процесів в інтенсивних режимах розвинутої турбулентності – в апаратах із регулярною пульсаційною насадкою (РПН).

Зважаючи на проведений аналіз наукових та практичних досягнень і водночас виявлені недоліки, сформульовані вищенаведені мета й завдання досліджень.

У другому розділі розглянуті об'єкт і методи досліджень, здійснена організація структури проведення теоретичних та експериментальних досліджень.

Методологічною основою запровадження системи оптимальних природоохоронних 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 аналіз є одним із напрямків системного підходу.

На рисунку 4 наведені етапи системного аналізу для розв'язання означеної вище задачі щодо зниження техногенного навантаження на довкілля промислових виробництв, що проявляється через прогнозування або мінімізацію забруднення об'єктів навколишнього середовища викидами дрібнодисперсних зважених речовин.

Можна описати такі етапи дослідження:

Етап 1. 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. 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;

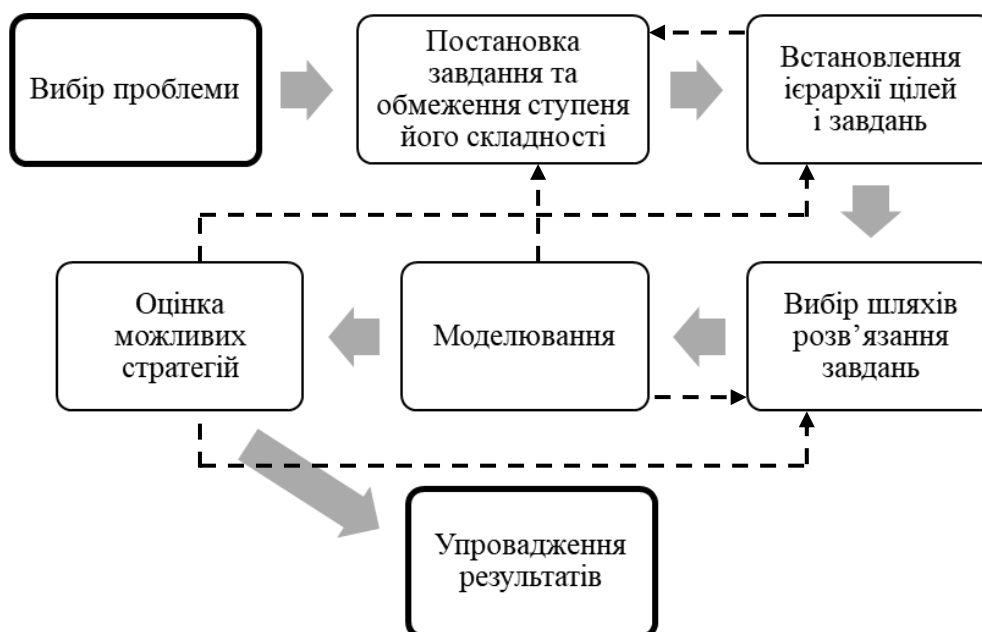


Рисунок 4 – Принципова схема системного аналізу для виконання поставлених завдань дослідження

- науково обґрунтувати вибір методів попередження або мінімізації рівня забруднення компонентів довкілля;
- розробити та 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 домішок в атмосфері спрогнозувати розміри зони впливу викидів промислових виробництв;
- дослідити процес пиловловлення дрібнодисперсних зважених речовин у високоефективних конструкціях апаратів.

Етап 3. Цей етап було реалізовано відповідно до попереднього етапу, на якому були визначені завдання та описані методи їх виконання.

Етап 4. 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 вискоефективного 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. 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. Полягає в оптимальному виборі технологічних природозахисних рішень з урахуванням бажаного екологічного й економічного ефекту від упровадження на виробництві.

Етап 7. Полягає в рекомендаціях і впровадженні у проектну й виробничу діяльність результатів дослідження.

З метою встановлення ступеня впливу дрібнодисперсного пилу на людину застосовано методіку кореляційно-регресійного аналізу для моделювання впливу респірабельного пилу на систему кровообігу людини.

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 фактору екологічної небезпеки та складової об'єкта дослідження, проведено паспортизацію пилу, що є необхідним кроком на шляху до вдосконалення систем очищення пилогазових викидів виробництв. Для паспортизації було обрано пил двоокису титану (TiO_2) через неефективність наявних способів очищення викидів виробництва пігментного двоокису титану на ПАТ «Сумхімпром».

Частинки пилу TiO_2 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» зображено на рисунку 5.

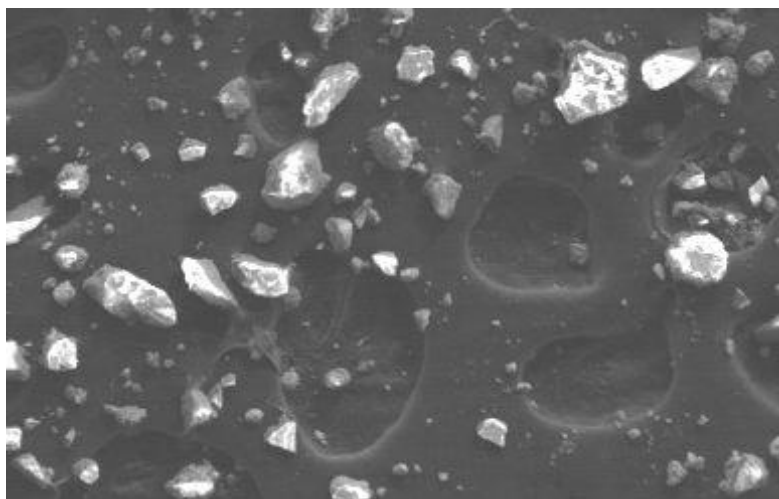


Рисунок 5 – Загальний вигляд пилу двоокису титану (збільшення x 3 000)

Проведена паспортизація свідчить про те, що пил TiO_2 є дрібнодисперсним із середнім діаметром частинок 0,3 мкм, а також має здатність до злипання й утворення агломерацій, що дозволяє проводити процеси очищення в апаратах, які забезпечують потрібні механізми очищення. Оскільки розмір частинок пилу TiO_2 навіть менший від нормованої величини $\text{PM}_{2.5}$, то такий пил може залишатися в повітрі довгий час та переміщатися на значні відстані. Викиди, що містять пил TiO_2 , мають потенціал негативно впливати на здоров'я населення через тривалий час перебування в завислому стані в атмосферному повітрі та забруднення атмосферного повітря на більшій території, ніж біля джерела викидів.

Зважаючи на специфіку роботи природоохоронного обладнання, формуються вимоги до пилогазоочисного обладнання, що буде відповідати умовам проведення процесу очищення від викидів $\text{PM}_{2.5}$. Установлено, що методика дослідження алгоритму вибору природоохоронного обладнання ґрунтується на дослідженні синтезу даних баз параметрів забруднюючих речовин, технологічних умов проведення процесу і параметрів природоохоронного обладнання.

Одним із сучасних математичних інструментів аналізу й спрощення інформації є побудова графів. Сукупність варіантів реалізації задачі знаходження оптимального природоохоронного обладнання подано на рисунку 6 у вигляді графа, де Φ_0 – розв'язання задачі; Φ_i – елемент розв'язання. Побудову графа виконано в програмному середовищі Gephi на основі алгоритму зниження розмірності – методики UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection).

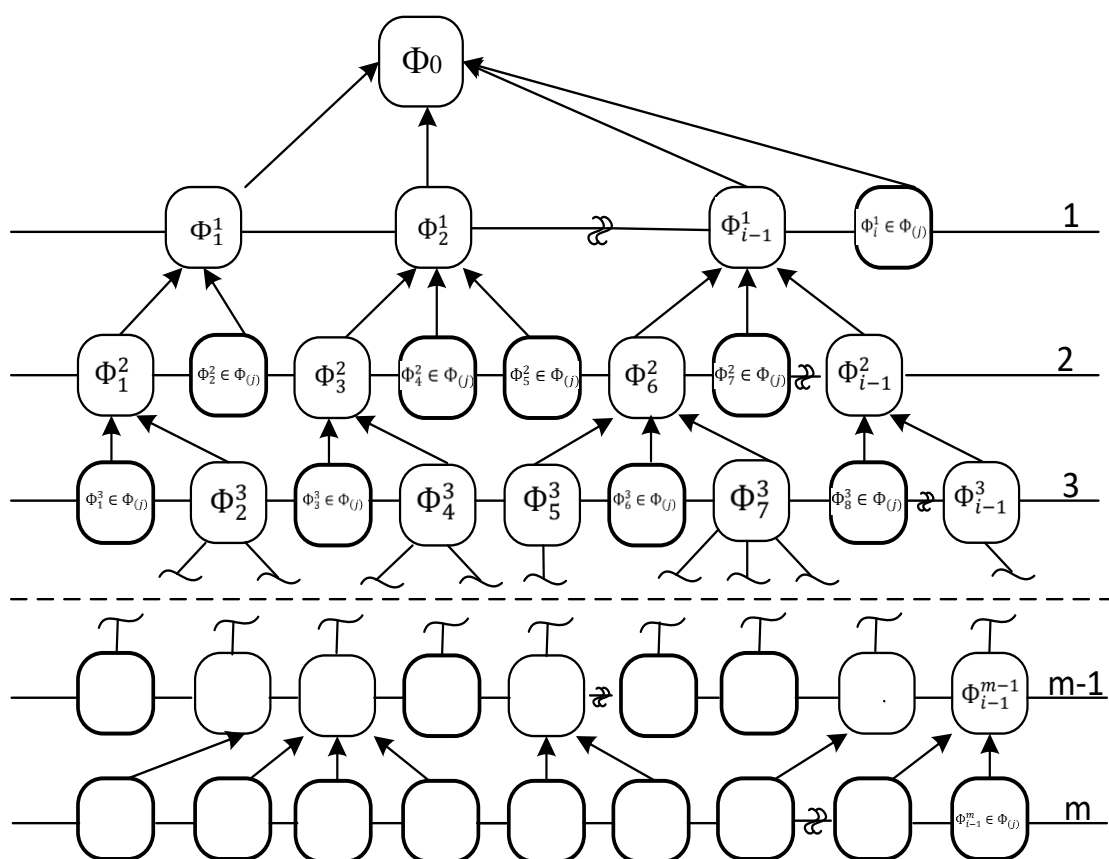


Рисунок 6 – Граф реалізації задачі (дерево розв'язків)

Якщо вершина графа Φ_0 , шлях до якої з Φ_i , може бути досягнута з використанням шляху довжиною 1, 2, ..., m етапів, то множину варіантів розв'язків задачі можна подати у вигляді

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

де $\Omega^{m-1}\{\Phi_i\}$ – множина вершин графа, які утворюють мости між Φ_i , Φ_0 .

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) в цьому разі:

$$\Phi_0^{\text{opt}} = \lim_{m \rightarrow 1} \{\Phi_0\}. \quad (2)$$

Під час розроблення процесів та апаратів природоохоронних технологій, необхідними етапами проектування є побудова початкової моделі, розроблення та перевірка ухвалених рішень на дослідницьких або напівпромислових установках. З огляду на це проводили експериментальні дослідження гідродинаміки та пиловловлення розроблених апаратів із РПН на лабораторних стендах, що мали ідентичні конструктивні розміри. Це дозволило забезпечити однакові умови досліджень та одержати більш точні й порівнянні результати експериментів.

Стенд для дослідження гідродинаміки та пиловловлення являв собою колону з такими розмірами: висота – 3 000 мм, довжина – 400 мм, ширина – 300 мм із установленою провальною тарілкою. Висота I зони для проведення процесів взаємодії газу з парорідинною сумішшю становила 1 000 мм, висота II зони для дослідження процесів вихроутворення – 2 000 мм.

Для моделювання розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин використано математичні методи чисельного розв'язання (метод покоординатного розщеплення, рекурсивно-ітераційний підхід) рівняння поширення домішок у турбулентному середовищі.

Для відбору проб повітря на вміст пилу використовували гравіметричний метод із застосуванням електроаспіратора і фільтрувального патрона. Дослідження елементного складу пилу на межі СЗЗ виконували з використанням растрової електронної мікроскопії з рентгенівським мікроаналізом – прилад РЕММА-102 (SELMІ, Україна).

Під час вимірювання концентрації пилу на виході з апарата використовували гравіметричний метод відповідно до Методики виконання вимірювань масової концентрації речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (пилу) в організованих викидах стаціонарних джерел гравіметричним методом за температури газопилового потоку до 600 °С (МВВ).

З метою усунення можливих помилок усі вимірювальні прилади, які використовували під час проведення досліджень, перевірені й прокалібровані та мають відповідні сертифікати. Ця процедура гарантувала точність і надійність

результатів досліджень, забезпечуючи використання обладнання, яке функціонувало на відповідному рівні точності й метрологічної стійкості.

Дані результатів експериментів аналізували за допомогою програмної системи аналізу даних Statistica, версія 13.0.0.0 (TIBCO SoftwareInc., 2017).

У третьому розділі проведено дослідження впливу викидів дрібнодисперсного пилю на здоров'я населення та встановлення взаємозв'язку між обсягами викидів та кількістю захворювань систем кровообігу в Україні. Унаслідок проведеного кореляційно-регресійного аналізу було побудовано математичні моделі (Y_m), які описували залежність між чисельністю населення (N), обсягами викиду різного за дисперсністю пилю (X_i) та кількістю захворювань (Y) за звітний період часу, що дозволило прогнозувати рівень захворюваності населення за різних рівнів пилю в повітрі (рис. 7).

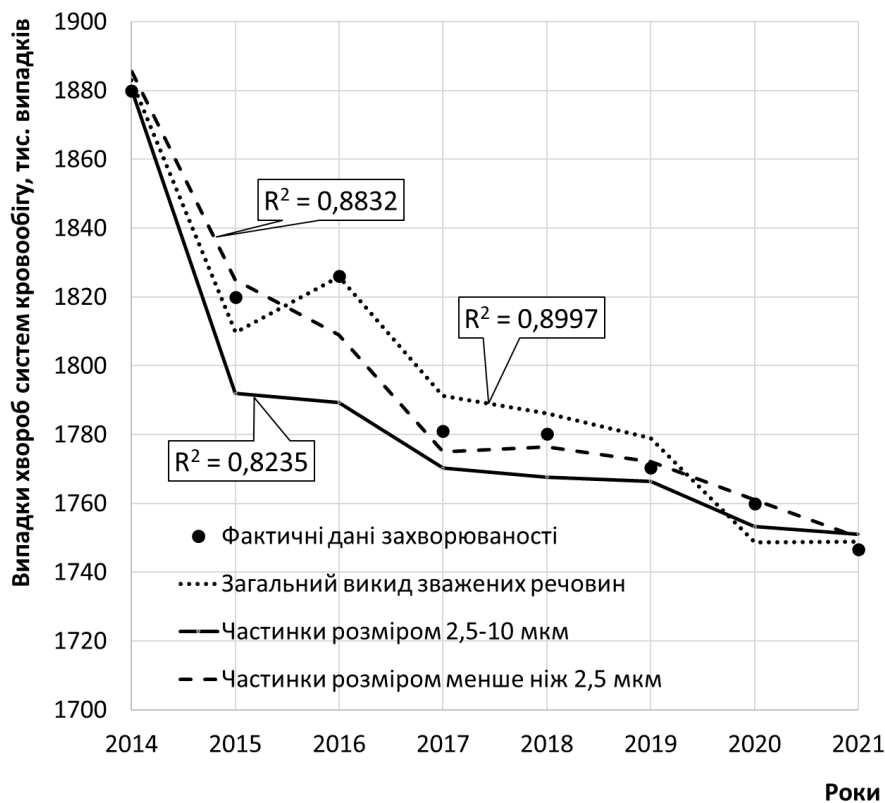


Рисунок 7 – Інтенсивність прояву хвороб систем кровообігу від загальної кількості викидів зважених речовин та різного дисперсного складу

Унаслідок аналізу графічних даних інтенсивності прояву хвороб систем кровообігу залежно від розміру пилю одержано такі моделі:

загалом для зважених речовин

$$Y_m = 763,979 + 0,021 \cdot N + 17,644 \cdot X_1, \quad (3)$$

для частинок розміром 2,5–10 мкм

$$Y_m = 383,129 + 0,032 \cdot N + 22,129 \cdot X_2, \quad (4)$$

для частинок розміром менше між 2,5 мкм

$$Y_m = 269,771 + 0,035 \cdot N + 46,244 \cdot X_3. \quad (5)$$

Порівняльний аналіз одержаних результатів дозволив установити, що захворюваність людини на хвороби системи кровообігу більшою мірою спричинена викидами твердих часток розміром до 2,5 мкм. Висока збіжність результатів математичної моделі щодо залежності впливу на хвороби систем кровообігу від кількості викидів $PM_{2.5}$, починаючи з 2017 року, зумовлена поступовим використанням сучасного обладнання для моніторингу атмосферних забруднень.

Одержані результати потребують розроблення заходів щодо зниження викидів $PM_{2.5}$ в приземному шарі атмосфери. 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.

Побудова математичної моделі потребувала вирішення таких 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.

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).

Для побудови алгоритму математичної моделі було використано тривимірне рівняння поширення домішок у турбулентному середовищі, яке для приземного шару з урахуванням закону збереження маси має такий вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial n(M,t)}{\partial t} + \eta(t)n(M,t) + \left(v_x \frac{\partial}{\partial t} (n(M,t)) + v_y \frac{\partial}{\partial t} (n(M,t)) + v_z \frac{\partial}{\partial t} (n(M,t)) \right) - \\ & - \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\tau_x(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau_y(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial y} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(\tau_z(M,t) \cdot \frac{\partial n(M,t)}{\partial z} \right) \right) = \omega(M,t), \end{aligned} \quad (6)$$

де $n(M,t)$ – концентрація забруднюючої речовини в заданій точці M від джерела викидів у певний момент часу t , $\text{кг}/\text{м}^3$; $\eta(t)$ – коефіцієнт, що характеризує ступінь видалення або привнесення домішок у заданий об'єм унаслідок хімічних або інших процесів, які відбуваються в приземному шарі атмосфери; v_x, v_y, v_z – векторні компоненти швидкості вітру, $\text{м}/\text{с}$; τ – турбулентність, що характеризується коефіцієнтом турбулентної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$, перенесення відбувається вздовж координатних осей Ox, Oy, Oz ; ω – потужність джерела викидів забруднюючих речовин, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$.

Для подальшого вирішення поставленого завдання використано метод покоординатного розщеплення (рис. 8).

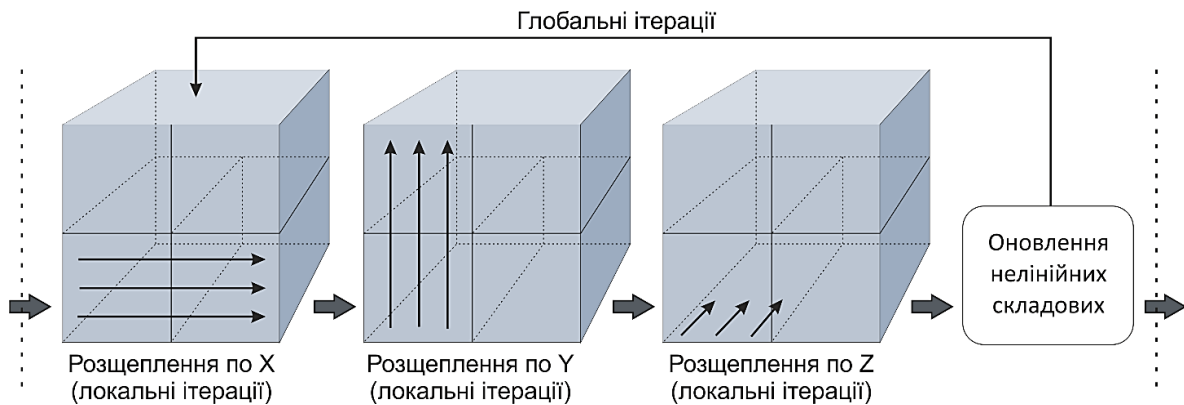


Рисунок 8 – Структура алгоритму для тривимірної задачі перенесення в межах рекурсивно-ітераційного підходу

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) за початкових умов $n(M, t)|_{t=0} = n(M, 0) = n_0(M)$;
- 3) за граничних умов $n(M, t) = \bar{n}(M, t)$, $P \in \bar{\Omega}$,

де $n_0(M)$, $\bar{n}(M, t)$ – задані функції; $\bar{\Omega}$ – межа зони простору Ω ; $n(M, t)$ – концентрація домішок у точці простору в певний момент часу t . У цьому разі поле турбулентності має вигляд діагональної матриці:

$$\tau(M, t) = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \tau_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{zz} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

де $\tau_{xx} = \tau_x(M, t)$, $\tau_{yy} = \tau_y(M, t)$, $\tau_{zz} = \tau_z(M, t)$, $\tau(M, t)$ – тензор.

Рівняння (6) і (7) є вихідними умовами побудови алгоритму і моделі поширення забруднюючих речовин у приземному шарі повітря.

Відповідно до методу покоординатного розщеплення розв'язування задачі (6) розбили на три частини ($t_j \leq t \leq t_{j+1}$):

I частина

$$\begin{aligned} n_1 + \eta n_1 + \frac{\partial}{\partial z}(v_z n_1) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\tau_z \frac{\partial n_1}{\partial z}\right) &= \delta_1 \omega(M, t); \\ M_1 &= M(z|x, y); M_4 = M(0|x, y); M_5 = M(z|x, y); \\ n_1(M_1, t=0) &= n_0(M_1), t=0; n_1(M, t_j) = n_3(M, t_{j+1}), \text{ при } t > 0; \\ n_1(M_4, t) &= \bar{n}_4(x, y, t); n_1(M_5, t) = \bar{n}_5(x, y, t). \end{aligned} \quad (8)$$

II частина

$$\begin{aligned} n_2 + \frac{\partial}{\partial x}(v_x n_2) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\tau_x \frac{\partial n_2}{\partial x}\right) &= \delta_2 \omega(M, t); \\ M_2 &= M(x|y, z); M_6 = M(0|y, z); M_7 = M(x|y, z); \\ n_2(M, t_j) &= n_1(M, t_{j+1}); n_2(M_6, t) = \bar{n}_6(y, z, t); n_2(M_7, t) = \bar{n}_7(y, z, t). \end{aligned} \quad (9)$$

III частина

$$\begin{aligned} n_3 + \frac{\partial}{\partial y}(v_y n_3) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\tau_y \frac{\partial n_3}{\partial y}\right) &= \delta_3 \omega(M, t); \\ M_3 &= M(y|x, z); M_8 = M(0|x, z); M_9 = M(y|x, z); \\ n_3(M, t_j) &= n_2(M, t_{j+1}); n_3(M_8, t) = \bar{n}_8(x, z, t); n_3(M_9, t) = \bar{n}_9(x, z, t); \\ \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 &= 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Для розв'язування рівняння (6) було припущено, що $n(M, t) = n_3(M, t)$. Далі виконано умови параметризації – нормування параметрів і функцій. Також було виконано нормування початкових та граничних умов, а потім – нормування коефіцієнтів параметризованої системи.

Для обчислення інтегралів, які входять до основних розрахункових формул ітераційно-рекурсивного обчислювального методу, потрібні значення підінтегральних функцій, що відповідають вихідному розподілу. Це також зумовлює входження до загальної схеми алгоритмів процедур апроксимації на заданому інтервалі вихідних функцій. В узагальненому вигляді алгоритм набирає вигляду для рівняння (6):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle n \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle t \rangle} + \langle n \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle) \cdot \left(\eta + \sigma \frac{\partial \langle \nu \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle x \rangle} \right) + \\ & + \frac{\partial \langle n \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle x \rangle} \cdot \left(\sigma \langle \nu \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle) - \varepsilon \frac{\partial \langle \tau \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle x \rangle} \right) - \\ & - \frac{\partial^2 \langle n \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle)}{\partial \langle x \rangle^2} \cdot (\varepsilon \langle \nu \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle)) = \zeta \langle \omega \rangle(\langle x \rangle, \langle t \rangle). \end{aligned} \quad (11)$$

Виконаємо нормування початкових і граничних умов, нормованих параметрів із $[0; 1]$ і спростимо рівняння (6):

$$\dot{n}(\langle x \rangle, \langle t \rangle) + B(\langle x \rangle, \langle t \rangle)n(\langle x \rangle, \langle t \rangle) + C(\langle x \rangle, \langle t \rangle) = 0. \quad (12)$$

Рівняння (12) розв'яжемо як однорідне диференціальне рівняння першого порядку відносно параметра t за $x = \text{const}$. Тоді

$$\begin{aligned} n(x, t) = e^{-\int_{t_0}^t \left(\eta(t') + \sigma(t') \frac{\partial \nu(x, t')}{\partial x} \right) dt'} & \left(n(x, t_0) - \int_{t_0}^t (f(x, t') - \right. \\ & \left. - \zeta \omega(x, t') e^{\int_{t_0}^{t'} \left(\eta(t'') + \sigma(t'') \frac{\partial \nu(x, t'')}{\partial x} \right) dt''} dt' \right), \end{aligned} \quad (13)$$

що також приводить до функції

$$n(x, t) = k(x, t) - \int_{t_0}^t \tilde{\omega}(x, t, t') f(x, t') dt'. \quad (14)$$

Таким чином, рівняння (14) є функцією розподілу домішок у приземному шарі атмосфери на основі рівняння (6) поширення домішок у турбулентному середовищі.

Знаходження функції (14) 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 й вихідні змінні, то раціонально було побудувати рівняння регресії. На його основі реалізовано повний центральний ортогональний композиційний план другого порядку. Для подальшої можливості порівняння значень концентрації, швидкості й температури нормували вхідні змінні за формулами вибіркового середнього значення.

Вихідними даними для моделювання були такі параметри:

1) величину швидкості вітру в моделі брали в діапазоні від 5 м/с до 10 м/с, що є небезпечною швидкістю вітру (досягаються найвищі концентрації забруднюючих речовин у приземному шарі);

2) температуру повітря в розрахунках брали на основі середніх значень теплого (+20 °С) й холодного (0 °С) періодів року;

3) турбулентність атмосферного повітря в діапазоні 10–155 м²/с;

3) висота джерела забруднення становила 65 м, діаметр труби – 1,2 м, температура викиду – 70 °С, концентрація забруднювача – $0,25 \cdot 10^{-3}$ г/м³. Дисперсний склад розрахункових частинок забруднювача – 0,3 мкм, густина частинок – $3 \cdot 10^3$ мг/см³.

Розмір розрахункової ділянки прийнято 10 · 10 км.

Для оцінки точності отриманої моделі обчислювали суми квадратів відхилень експериментальних значень вихідних змінних від розрахункових.

Адекватність моделі перевірялась за критерієм Фішера, а оцінювання значущості коефіцієнтів моделі проводили на основі розподілу Стюдента. Далі, впевнившись в 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 у математичному середовищі РТС Mathcad Prime 7 (рис. 9).

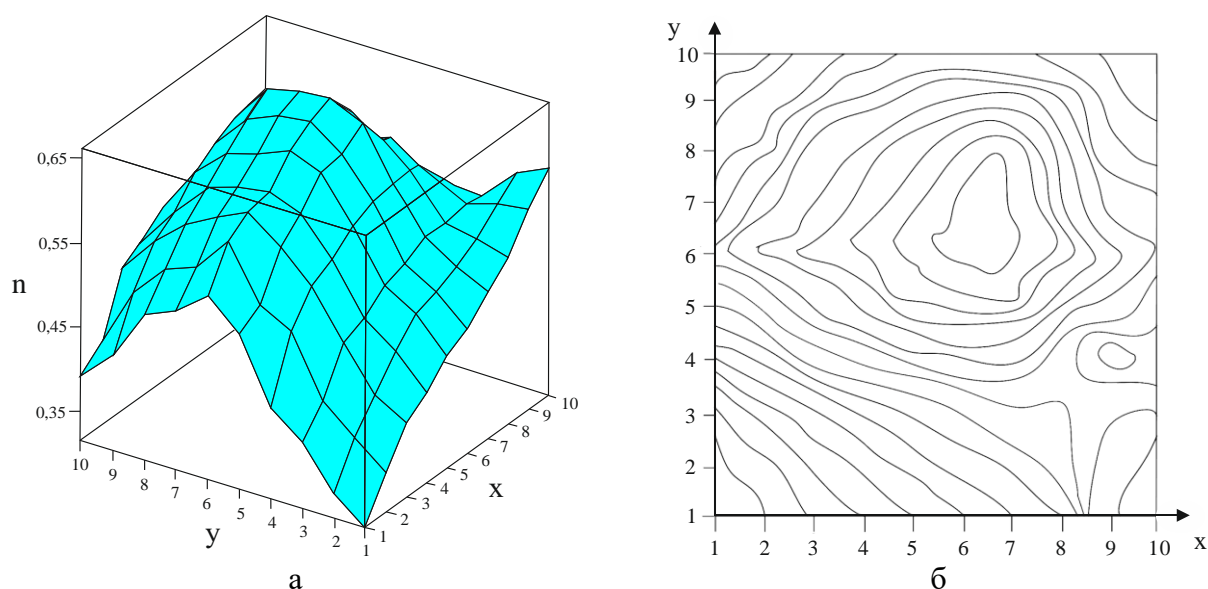


Рисунок 9 – Розподіл концентрації $n(M, t)$ за $v = 5$ м/с (а) та лінії концентрацій при $n = 0,5$ кг/м³ (б), $\tau_{1,0} = 155$ м²/с, $\tau_{2,0} = 55$ м²/с, $\tau_{3,0} = 15$ м²/с

Поверхневі коливання спричинені турбулентною дифузією й швидкістю вітру. Візуальні результати моделювання 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 поширення дрібнодисперсних забруднюючих речовин потребує сучасного комп'ютерного програмного забезпечення, доступного для 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.

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. Місця відбору проб позначено на рисунку 10 – суміщеній фізичній карті території навколо ПАТ «Сумихімпром» та розрахунковій карті згідно зі спеціалізованою програмою «ЕОЛ 2000» (методика ОНД-86).

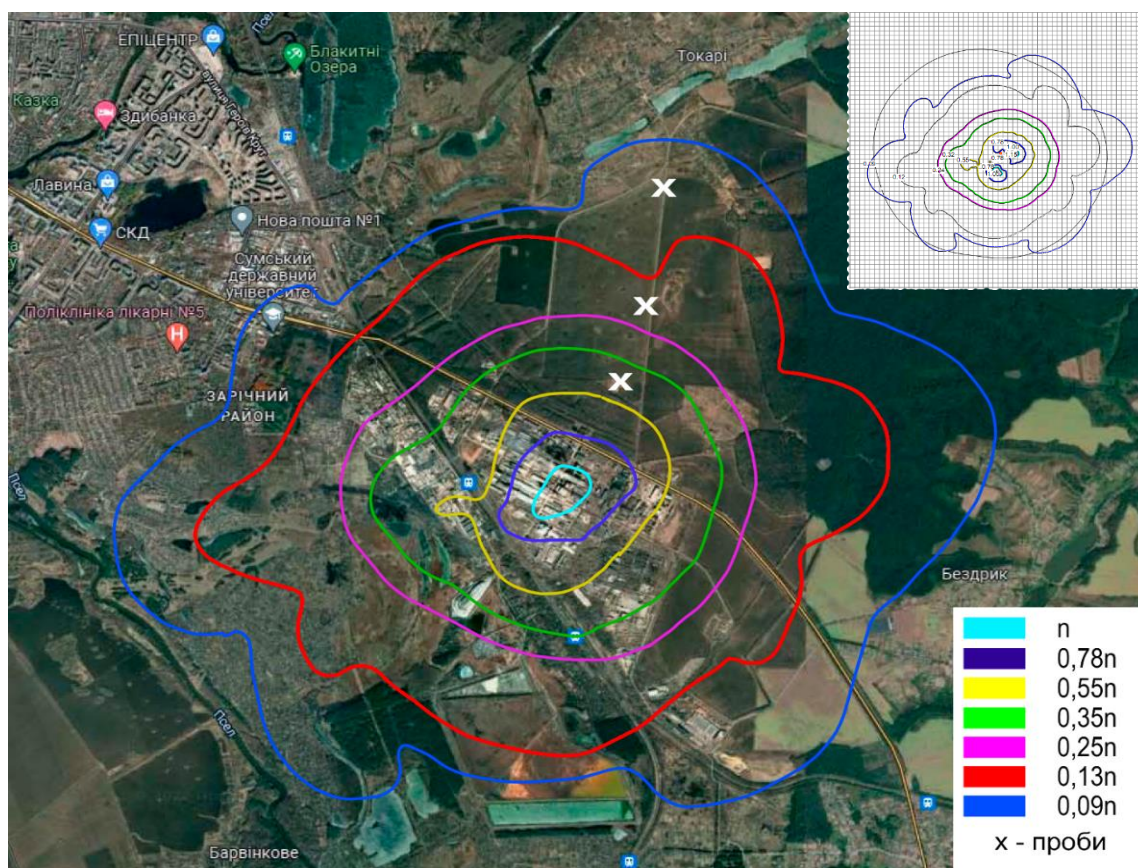


Рисунок 10 – Розміщення джерела забруднення з початковою концентрацією викиду забруднюючих речовин n і точками відбору проб x

Місця відбору проб позначені «X» та одержані результати вимірювань запиленості повітря за напрямом вітру наведені в таблиці 1 (за початкової

концентрації $n = 1 \text{ г/м}^3$). Попередні вимірювання вмісту в приземному шарі атмосферного повітря частинок двоокису титану, проведені у 2018 і 2019 роках, свідчать про стабільне надходження цих речовин у довкілля й те, що за цей період часу не відбувалося істотних змін у процесі очищення викидів.

Таблиця 1 – 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

Аналіз графіка розподілу концентрацій (рис. 11) на відстані від джерела викиду дозволяє встановити, що результат математичного моделювання подібний до результату розрахунку за методикою ОНД-86. Суцільна лінія є степеневою залежністю результатів розрахунку розсіювання математичної моделі (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9816$), пунктирна лінія – результат розрахунку за методикою ОНД-86 ($R^2 = 0,946$).

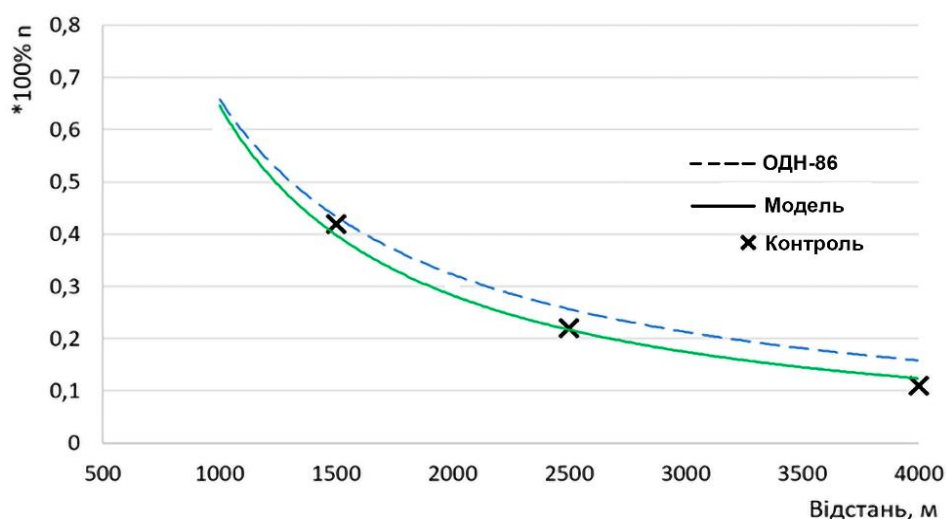


Рисунок 11 – Порівняльний аналіз результатів розрахунку розсіювання дрібнодисперсного пилу за математичною моделлю, методикою ОНД-86 та контрольного відбору проб

Для перевірки адекватності математичної моделі та методики ОНД-86 експериментальним значенням концентрацій проведемо кореляцію значень величин згідно з графіками на рисунку 13. Так, кореляція значень розрахунків згідно з методикою ОНД-86 і експериментальними значеннями становить збіжність розрахунків на рівні 96 %. Кореляція даних математичної моделі та експериментальних значень установлює збіжність результатів на рівні 97 %, що свідчить у цьому разі про більшу адекватність математичної моделі порівняно з методикою ОНД-86.

Розроблено Web-додаток для оцінювання дальності поширення забруднюючих речовин від джерела їх викидів із використанням HTML-розмітки, CSS-стилів і мови програмування JavaScript (рис. 12). Web-додаток є спрощеною програмою для оброблення алгоритму математичної моделі розсіювання забруднюючих речовин і може використовуватися в системах моніторингу для інформування та контролю викидів промислових підприємств на різних рівнях.

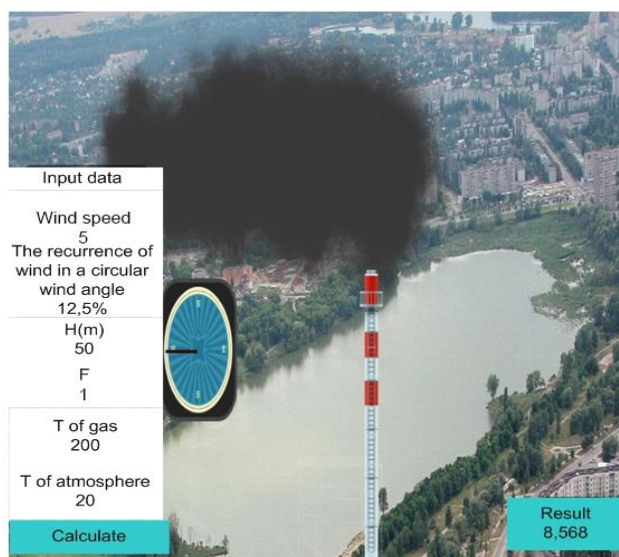


Рисунок 12 – Інтерфейс Web-додатка

Установлено, що за умови сталого розвитку недостатньо, щоб концентрація шкідливих речовин не перевищувала допустимі значення на межі санітарно-захисної зони будь-якого підприємства, вона повинна бути значно меншою. Для цього потрібно впроваджувати раціонально-обґрунтовані технології й високоефективне обладнання, одним із яких є застосування апаратів із РПН.

У четвертому розділі реалізовано системний підхід до обґрунтованого вибору ефективного природозахисного обладнання. Зведені характеристики обладнання та параметри технологічного процесу потребують багато часу для обґрунтованого рішення щодо вибору обладнання. Складність запропонованих підходів полягає в громіздкості баз даних обладнання, обмеженому переліку характеристик забруднюючих речовин (ЗР) та вузькій спрямованості вибору обладнання на відповідність технічним вимогам.

Проблема обґрунтованого вибору оптимального пилогазоочисного обладнання полягає в тому, що необхідно враховувати параметри ЗР та технологічні умови середовища проведення процесу очищення. У загальному вигляді методику вибору оптимальних технологічних рішень для очищення пилогазових викидів подано на рисунку 13.

Співвідношення цих блоків між собою дає певний еколого-технологічний результат застосування технологічного рішення в разі конкретної ЗР. Кожний із наведених блоків (X, Y, Z) можна уявити сукупністю характеристик його параметрів (X_i , Y_i , Z_i).

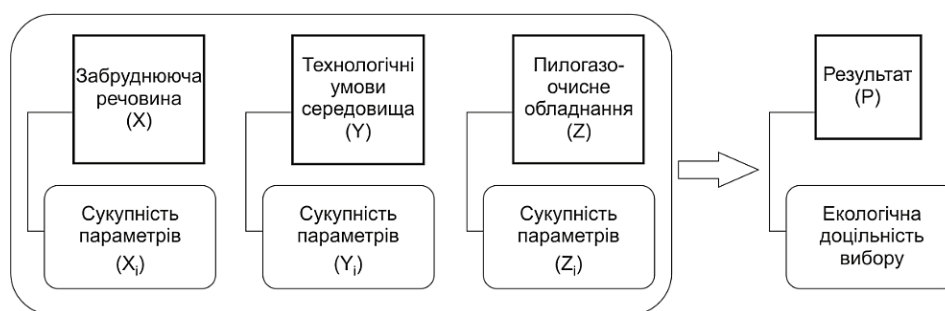


Рисунок 13 – Схема умов вибору природоохоронного обладнання

Для узагальнення інформації щодо бази даних ЗР наведемо базу даних для конкретних ЗР підприємств теплоенергетики та хімічної промисловості (табл. 2).

Таблиця 2 – База даних ЗР у теплоенергетиці та хімічній галузі

Забруднююча речовина	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
Аерозоль двоокису титану	0	0,26	2 920	3	4	2	TiO ₂	10	780	0	36	0	0	0
Пил ільменіту	0	7,20	3 600	3	4	2	FeTiO ₃	10	320	0	72	0	0	0
Діоксид сірки	1	–	2,619	–	3	2	SO ₂	10	–	0	–	2	1	1
Діоксид азоту	1	–	2,052	–	3	2, 3	NO ₂	2	–	0	–	2	1	1
Сірчана кислота	1	–	1836	–	2	1, 2, 3	H ₂ SO ₄	1	–	0	–	2	1	1
Діоксид вуглецю	1	–	1,839	–	4	2	CO ₂	3	–	0	–	2	1	1

База містить інформацію для ухвалення виважених рішень щодо вибору обладнання, а саме:

X₁ – агрегатний стан ЗР, твердий – 0, рідкий та газоподібний – 1;

X₂ – дисперсність ЗР, мкм;

X₃ – густина ЗР, мг/см³;

X₄ – форма частинок ЗР, ізометрична – 3, пластинчаста – 2, волокна – 1;

X₅ – клас небезпеки ЗР;

X₆ – дія на організм людини, подразнення / пошкодження шкіри – 3, респіраторна / фіброгенна – 2, отруйна / канцерогенна – 1;

X₇ – хімічний склад ЗР;

X₈ – гранично допустима концентрація ЗР, мг/м³;

X₉ – злипання частинок ЗР, Па;

X₁₀ – горючість частинок ЗР, горючі – 1, негорючі – 0;

X₁₁ – змочуваність частинок ЗР, °;

X₁₂ – розчинність у воді ЗР, розчинна – 2, слабозчинна – 1, нерозчинна – 0;

X₁₃ – здатність ЗР до сорбції сторонніх компонентів середовища під час проведення процесу очищення, сорбент – 1, не здатна до поглинання – 0;

X₁₄ – здатність ЗР вступати в хімічну реакцію, здатна – 1, не здатна – 0.

База даних параметрів технологічних умов середовища проведення процесу очищення характеризується набором умов під час викиду

забруднюючих речовин та визначенням вибору параметрів для реалізації технічних рішень:

Y_1 – умова вмісту вологи у викиді забруднюючих речовин, так – 1, ні – 0;

Y_2 – умова максимального обсягу викидів, м³/год;

Y_3 – умова максимального значення температури викиду забруднюючих речовин, °С;

Y_4 – умова наявності сторонніх домішок, окрім конкретної забруднюючої речовини.

Узагальнення бази параметрів технологічних умов середовища наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – База даних технологічних умов середовища

Тип умови	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1-й варіант	0	3 000	100	0
2-й варіант	0	30 000	250	0
...
n-й варіант	0 або 1	0 або 1

Третім ключовим блоком дослідження є формування бази даних параметрів пилогазоочисного обладнання (табл. 4), що може бути використане для видалення забруднюючих речовин (або є в наявності на конкретному промисловому підприємстві, або потенційно можливе для використання).

Таблиця 4 – База даних пилогазоочисного обладнання

Найменування пилогазоочисного обладнання	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}
Електрофільтр типу ЕГУ (ЕГУ1-7/400-4-4/2.56-2-11.2)	0	36 200	200	90	50	0,1	330	1	–	1
Електрофільтр КХП ЕСТ-11,4-4-Ш	0	40 500	200	6	20	0,1	330	1	–	1
Рукавний фільтр ФРП-25	0	2 400	2 000	10	20	0,3	135	0,55	–	0
Рукавний фільтр ФРП-1200	0	110 000	2 000	10	20	0,3	135	0,55	–	0
Двоступінчастий фільтр тонкого очищення СРФ5КР*6 (6 секцій)	0	30 000	2 500	120	1	1	240	0,15	–	0
Батарейний циклон БЦ-512 (односекційний)	0	6 500	1 300	75	10 000	10	400	4	–	1
Скрубер Вентурі СВ 150/90-800	1	7 000	1 200	30	500	1	400	5	7	1
Апарат із провальними тарілками великих отворів ПТВО ($d_0 = 0,06$ m)	1	40 000	1 200	20	50	0,25	400	3,5	10	1
Скрубер із рухомою насадкою ШВ-50	1	50 000	3 500	30	100	0,5	300	10	10	1
Апарат із РПН (висхідна прямотечія)	1	50 000	1 000	30	50	0,25	300	12	3	1

Таблиця 4 враховує такі параметри обладнання:

Z_1 – параметр апарата, що відповідає за можливість сухого або мокрого способу очищення, мокрого типу – 1, сухого типу – 0;

Z_2 – максимальне навантаження апарата за газовою фазою, $\text{м}^3/\text{год}$;

Z_3 – гідравлічний опір апарата, Па;

Z_4 – допустима концентрація забруднюючої речовини на вході в апарат, $\text{г}/\text{м}^3$;

Z_5 – мінімальне значення концентрації забруднюючої речовини на виході з апарата, $\text{мг}/\text{м}^3$;

Z_6 – ефективність уловлювання за фракційним складом частинок забруднюючої речовини (мінімальний розмір частинок), мкм ;

Z_7 – верхня температурна межа можливої роботи апарата, $^{\circ}\text{C}$;

Z_8 – максимальна швидкість газу в перерізі апарата, $\text{м}/\text{с}$;

Z_9 – витрата поглинальної рідини, $\text{м}^3/\text{годину}$;

Z_{10} – параметр обладнання, що відповідає за можливість роботи із злипливими частинками забруднюючої речовини, здатні ефективно працювати із злипливими частинками – 1, не здатні – 0.

Важливим не експлуатаційно-технічним додатковим параметром може бути вартість у разі відповідності кількох типів апаратів умовам вихідної задачі (Z_{11}).

За допомогою алгебри висловлень сформульовано поступовість і наслідування роботи алгоритмічної програми розрахунку оптимального вибору природоохоронного обладнання на основі параметрів забруднюючих речовин та технологічних умов середовища проведення процесу очищення. Розроблено алгоритм мережевої моделі вибору обладнання (рис. 14). Вузли мережі є методами, відрізки шляху відповідають параметрам забруднюючих речовин та умовам середовища.

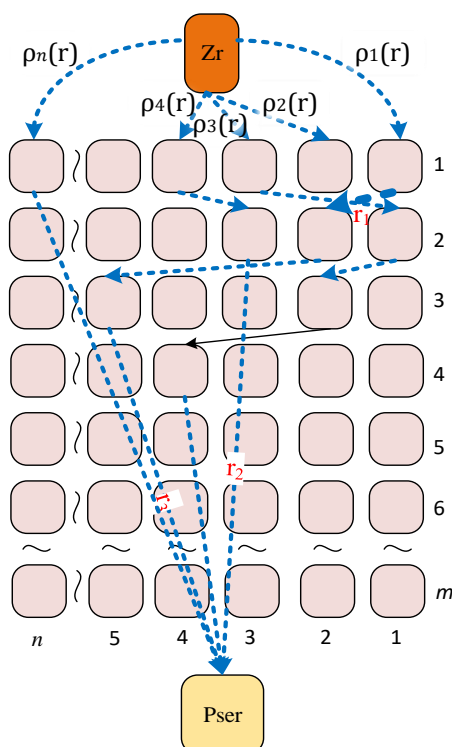


Рисунок 14 – Мережева модель вибору обладнання

Для розроблення програмного застосунку алгоритму вибору природоохоронного обладнання скористалися методом послідовної ієрархічної кластеризації.

З урахуванням послідовних ієрархічних зіставлень кластерів елементів (X_i , Y_i , Z_i) на рисунку 15 отримано уточнену блок-схему умов вибору технологічного устаткування порівняно з рисунком 13.

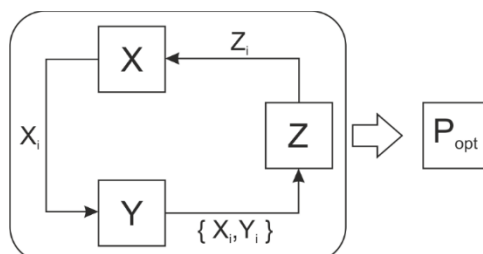


Рисунок 15 – Схема послідовного підбору кластерів умов вибору природоохоронного обладнання

Унаслідок підбору всіх параметрів пилогазоочисного обладнання на відповідність технологічним умовам середовища та характеристикам забруднюючих речовин кінцевий результат від різноманітних конфігурацій апаратів можна подати виразом:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{opt} \in \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i\} - opt. \quad (15)$$

Для зручності використання програмний алгоритм вибору природоохоронного обладнання для зменшення викидів у повітря реалізовано в онлайн-сервісі – Google-Таблиці.

Була здійснена перевірка застосування цього алгоритму підбору обладнання для очищення викидів об'ємом 5 000 м³/годину за температури 80 °С від дрібнодисперсних зважених частинок (аерозолі) двоокису титану, що містять додаткову вологу та сторонні забруднюючі речовини.

З метою послідовного порівняння кластерів трьох баз даних використано формальні умови ДОРІВНЮЄ, БІЛЬШЕ, МЕНШЕ, ДОРІВНЮВАТИМЕ, вбудовані логічні команди TRUE або FALSE (рис. 16) й таблиці істинності 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			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 16 – Умови відповідності параметра Z_1 параметрам баз даних X, Y

Результат послідовного порівняння параметрів трьох баз даних (X, Y, Z) дозволяє одержати фінальні значення оптимальних параметрів Z_i для поставленого завдання. Застосування логічних фільтрів відповідності параметрів

Z_i до бази обладнання приводить до рекомендованого результату застосування двох типів апаратів із 10 запропонованих типів природоохоронного обладнання в базі обладнання Z (рис. 17).

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a filter formula in cell F7. The formula is: `=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)`. A red box highlights two rows in the table below: 'Apparatus with a regular pulsating nozzle' and 'Apparatus with Large Holes Sieve Trays do = 0,06 m'. A red arrow points from the first row of the table to the filter formula.

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Optimal parameters Zi	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
Apparatus with Large Holes Sieve Trays do = 0,06 m	1	40000	1200	20	50	0,25	400	3,5	10	1

Рисунок 17 – Підсумковий підбір технічного рішення

Додатковий критерій вартості Z_{11} , віддає перевагу вибору апарата з РПН через його меншу матеріаломісткість, енергоспоживання й витрату рідини на зрошення, тому цей варіант розміщено на першому рядку програми.

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

У п'ятому розділі з метою підвищення рівня екологічної безпеки проведено теоретичні й практичні дослідження гідродинаміки та механізмів пиловловлювання в апаратах із розвиненою поверхнею контакту фаз. На основі лабораторних досліджень запропоновано конструкції апаратів з РПН – форсунокового та ежекційного типів (рис. 18) із регулярним розміщенням турбулізуючих елементів.

Аналіз гідродинамічної картини на рисунку 19 для ежекційного апарата з РПН дозволяє стверджувати про можливість вискоєфективного перебігу процесів пиловловлювання та масообміну за розвиненого проточного режиму взаємодії фаз, у цьому разі верхнє значення швидкості пилогазового потоку може бути обмежене величиною не більше ніж 12 м/с, оскільки за $W_r > 12$ м/с можна спостерігати значне зростання гідравлічного опору апарата.

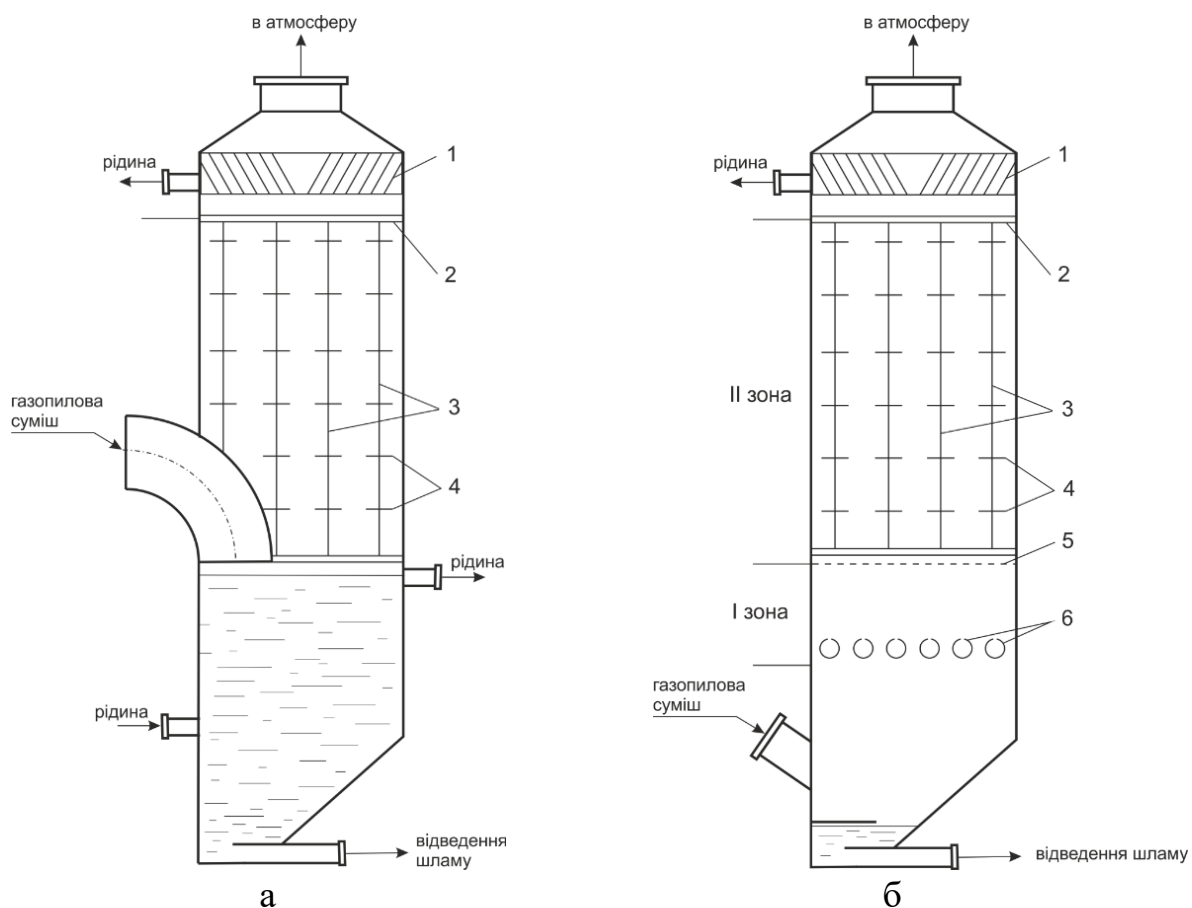


Рисунок 18 – Дослідні конструкції апаратів із РПН ежекційного (а) та форсункового типів (б):

1 – відцентровий краплеловлювач; 2 – фіксувальна решітка; 3 – струни;
4 – пластини; 5 – розподільна решітка; 6 – циліндри з форсунками
для введення парорідинної суміші

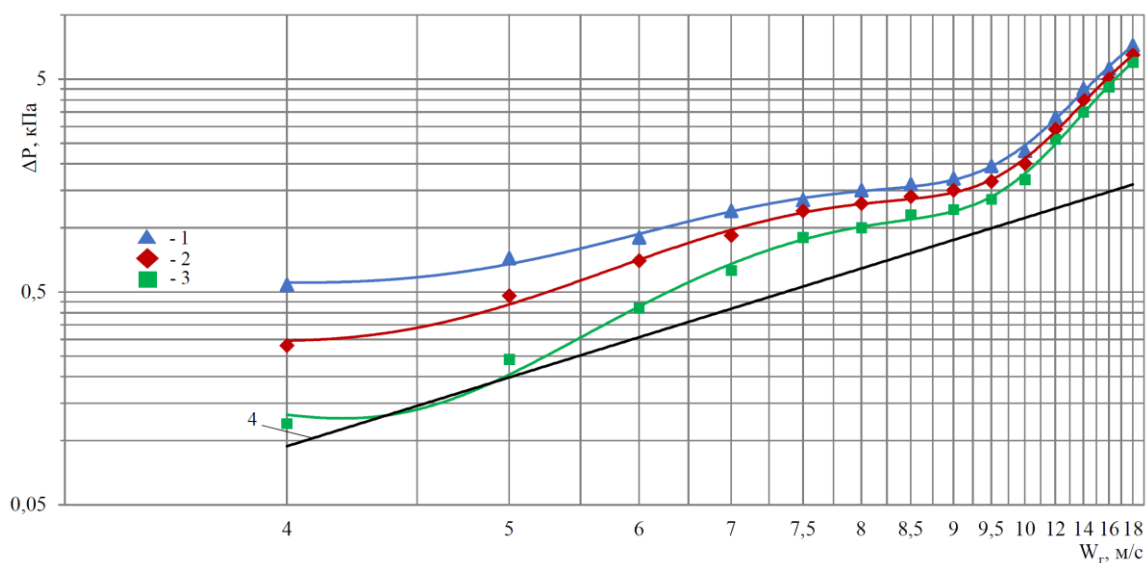


Рисунок 19 – Залежність гідравлічного опору ежекційного апарата з РПН від швидкості газу за умови різного початкового рівня рідини:
1 – $h_o = +0,03$ м; 2 – $h_o = 0$ м; 3 – $h_o = -0,03$ м; 4 – без рідини

Гідрравлічний опір форсункового варіанта апарата в режимі прямої течії в 3,4–3,7 рази нижчий, ніж в ежекційному варіанті (рис. 20).

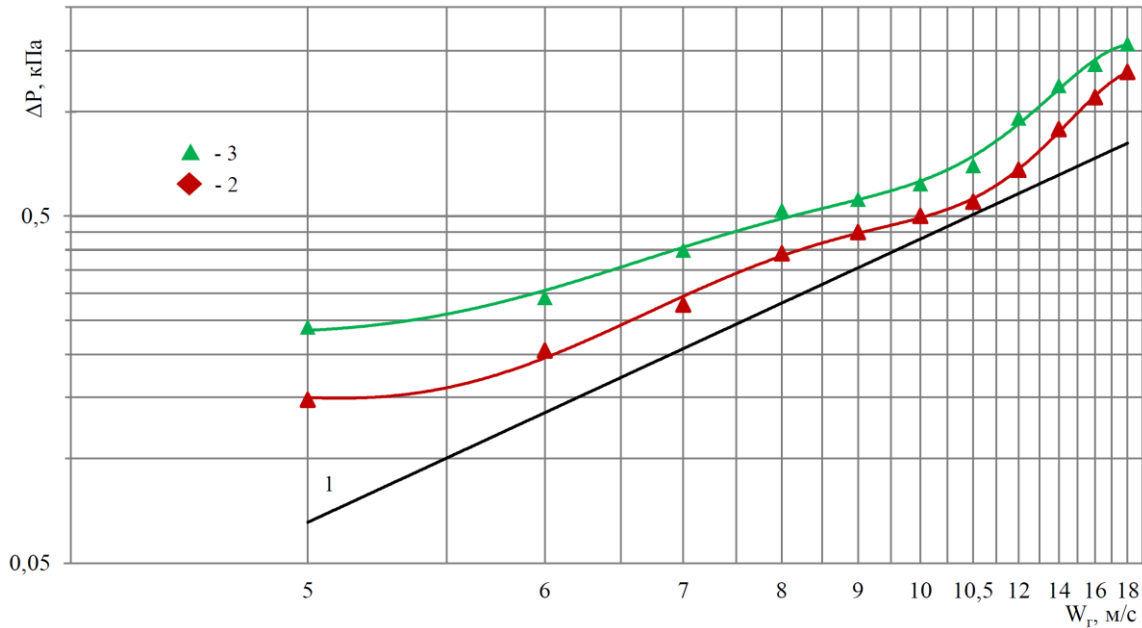


Рисунок 20 – Залежність гідрравлічного опору форсункового апарата з РПН від швидкості газу за різної щільності зрошення:

1 – $m = 0 \text{ м}^3/\text{м}^3$; 2 – $m = 0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$; 3 – $m = 1,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$

Робочим режимом для обох розроблених конструкцій апарата з РПН є прямої течійний, що забезпечує інтенсивну взаємодію фаз із дробленням та коагуляцією крапель рідини, тобто постійним оновленням поверхні осадження.

Одержано рівняння для розрахунку гідрравлічного опору ежекційного (16) та форсункового (17) типів апаратів із РПН:

$$\Delta P = \left(\zeta_n + \zeta_n \cdot \frac{1}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{1}{\Gamma^2} \cdot \frac{H_{кз}}{t_g} + \zeta_e \right) \frac{\rho_z \cdot W_n^2}{2} + \rho_p \cdot g \left[(1 - \varphi_e) \Delta h + h_p \right], \quad (16)$$

$$\Delta P = \left(\zeta_{pp} \cdot \frac{1}{S_o^2} + \zeta_n \cdot \frac{1}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{H_{кз}}{t_g} + K \cdot m^{2/3} \cdot \frac{1}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_z} \right) \frac{\rho_z \cdot W_z^2}{2}, \quad (17)$$

де ζ_n , ζ_{pp} – коефіцієнти місцевого опору відповідно патрубку і розподільчої решітки; ζ_n – коефіцієнт опору насадки; S_o – вільний переріз розподільчої решітки, $\text{м}^2/\text{м}^2$; W_n , W_z – відповідно швидкість газу у вхідному патрубку і вільному перерізі апарата, $\text{м}/\text{с}$; ρ_z , ρ_p – густина газу й рідини відповідно, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; $H_{кз}$ – висота контактної зони, м ; t_g – крок між елементами насадки за вертикаллю, м ; ε_n – порозність насадки в ряду, $\text{м}^2/\text{м}^2$; t_g – крок між елементами насадки по вертикалі, м ; φ_e – газовміст у зоні ежекції, $\text{м}^2/\text{м}^2$; Δh – кількість рідини, витискуваної в контактну зону, м ; h_p – кількість утримуваної рідини, м ; K – коефіцієнт; m – питома зрошення, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Похибка рівняння (16) $\pm 10\%$, рівняння (17) $\pm 11\%$. Діапазони $W_2 = 4\text{--}18\text{ м/с}$, $m = (0,5\text{--}1,5) \cdot 10^3\text{ м}^3/\text{м}^3$. Для зручності розрахунку гідродинамічних параметрів апаратів із РПН розроблено програмні алгоритми з використанням алгоритмічної мови С++ та в середовищі MS Office Excel.

Ефективність пиловловлення розроблених конструкцій апаратів з РПН проводили в прямотечійному режимі роботи за швидкості 7–14 м/с, витрати рідкої фази $(0,5\text{--}1,5) \cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{м}^3$ пилогазової суміші. Як дрібнодисперсні пилові включення використовували розпилений TiO_2 . Результати наведено на рисунках 21, 22.

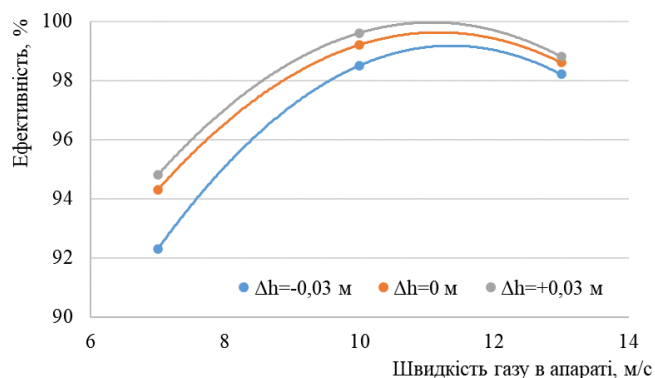


Рисунок 21 – Ефективність пиловловлення в ежекційному апараті з РПН залежно від швидкості газу й різного значення рівня рідини (Δh)

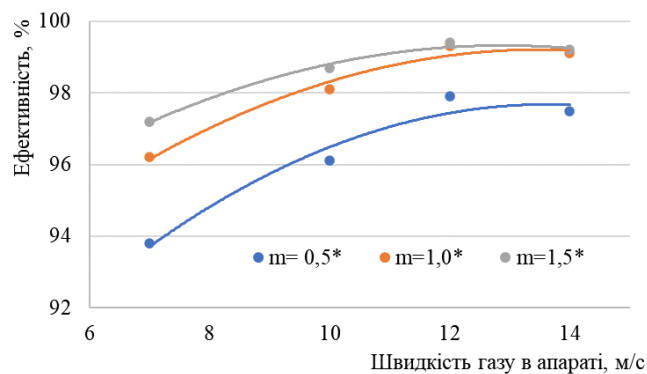


Рисунок 22 – Ефективність пиловловлення у форсунковому апараті з РПН залежно від швидкості газу й щільності зрошення m , ($\cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{м}^3$)

У цьому розділі 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 турбулізуючими елементами насадки у верхній частині апарата. Розроблено модель взаємодії зваженої частинки речовини в одиничному вихорі.

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 краплями рідини в апараті з РПН, що свідчить про можливість роботи з широкою номенклатурою пилогазових викидів промисловості, які містять дрібнодисперсні зважені речовини.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано фактори екологічної небезпеки від промислових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини. Унаслідок аналізу статистичних баз даних установлено, 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 (втратаю 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 PTC Mathcad Prime 7. Одержано розподіл концентрацій домішок для різних значень турбулентності атмосферного повітря ($10\text{--}155\text{ м}^2/\text{с}$) та небезпечної швидкості вітру ($5\text{--}10\text{ м/с}$). 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. З 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 течії 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 турбулізуючими елементами насадки у верхній частині апарата. Математичні моделі дозволяють проєктувати 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 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. Гурец, И. Козий, Д. Пляцук. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 64 с.

Здобувачеві належать розділи 3 та 4, що стосуються дослідженню гідродинаміки й пиловловлення в апаратах із провальними тарілками великих отворів, дослідження процесів абсорбції газових викидів на промислово-дослідних установках із 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 : НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка» – Дніпро : Середняк Т. К. 2022. С. 313–325.

Здобувачеві належить інформація щодо розробки вихідних баз даних для розробки програмного алгоритму вибору природозахисного обладнання, логічний і 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 фактору екологічної небезпеки з метою вибору відповідного пилоочисного обладнання та підвищення ефективності пилоочищення.

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.

Здобувач розробив математичну модель розсіювання твердих частинок та її розв'язання методом скінченних елементів з урахуванням дисперсності пилу, що може бути використана для розрахунку концентрації дрібнодисперсного пилу на заданій відстані від джерела за певної швидкості вітру й заданої потужності джерела.

5. Козий И. 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 проаналізував негативний вплив 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 проаналізував наявну інформацію про властивості пилу рослинного походження, виявив масштаби впливу на довкілля забруднюючих речовин рослинного походження, запропонував організаційні й технологічні заходи щодо скорочення негативного впливу на здоров'я людини та довкілля.

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.

Здобувачеві належать дослідження гідродинаміки апаратів із 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.

Здобувачеві належать функціональні залежності ефективності екологічних процесів від кінетичних характеристик, механізмів формування міжфазової 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 та 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 одержав систему диференціальних та інтегрально-диференціальних рівнянь, що дозволяють описати процес збільшення аерозольних частинок унаслідок конденсаційного й коагуляційного зростання, розрахував ефективність уловлення

туманів та інших аерозолів у 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 наявних класифікацій аерозолію з урахуванням найбільш вагомих фізико-хімічних характеристик, таких як злипливість частинок, гігроскопічність та здатність поглинати додаткові речовини із зовнішнього середовища, що є вагомим чинником під час вибору технологічних природозахисних 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.

Здобувач математично довів негативний вплив дрібнодисперсного пилу в атмосферному повітрі на стан здоров'я людини; одержані коефіцієнти детермінації дозволяють стверджувати, що викиди дрібнодисперсного пилу є однією з основних причин розвитку хвороб системи кровообігу в 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.

Здобувач одержав аналітичні розв'язки для оцінювання 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. 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.

Здобувачеві належить установаження основних гідродинамічних режимів роботи та оптимальних робочих діапазонів роботи апарата з регулярною пульсаційною насадкою й підтвердження того, що вихровий перебіг потоку і його відривний (пульсаційний) характер руху значною мірою сприяють інтенсифікації процесів збільшення та осадження частинок забруднюючих речовин.

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus і 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 очищення газу від пилу двоокису титану – 9,2 %, і пилу ільменіту – 99,5 %, запропонував рекомендації щодо впровадження апарата з провальними тарілками великих отворів замість наявного пиловловлюючого обладнання на трьох стадіях процесу виробництва двоокису титану: розмелювання ільменіту, прожарювання та розмелювання 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, Web of Science)**.

Здобувач установив 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 теоретично обґрунтував процес поширення забруднюючих речовин у 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, Web of Science, Q4)**.

Здобувач одержав рівняння для визначення радіуса частинки в процесі конденсації парогазорідної системи, що дозволяє визначити можливість уловлювання частинок за рахунок інерційного або турбулентно-дифузійного механізму в апараті з регулярною пульсаційною насадкою, а також одержав рівняння для розрахунку діаметра крапель рідини, утворюваних під час дроблення рідинних потоків турбулізуювальними 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, Web of Science)**.

Здобувач за допомогою програми VOSviewer здійснив візуалізацію мережевої системи із використанням 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, Web of Science, Q4)**.

Здобувач реалізував логічний та математичний опис одночасного обліку параметрів забруднюючих речовин, умов середовища і параметрів технологічного обладнання; унікальність розробленого алгоритму полягає в повторній перевірці відповідності кожного параметра обладнання умовам середовища й 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, Web of Science, Q3**).

Здобувачеві належать розроблення алгоритму побудови математичної моделі розсіювання забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери, побудова програмного алгоритму розрахунку в середовищі PTC Mathcad Prime 7, пояснення графічних візуалізацій розрахунку математичної моделі.

Наукові праці, що 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 / І. С. Козій. *XI 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»*. 7 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». 7 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.

Здобувачеві належить розділ 2, що стосується узагальнення теоретичних відомостей наявних методик побудови моделей забруднення атмосферного повітря, розроблення 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 : ВТД «Університетська книга», 2022. 390 с.

Здобувачеві належить розділ 12, що стосується створення безпечних виробництв (захист навколишнього середовища, розроблення безвідходних і маловідходних виробництв, забезпечення безаварійної експлуатації), загальне редагування змісту матеріалу, підготовка макету та розроблення дизайну.

АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. Суми, Сумський державний університет, 2023. Спеціалізована вчена рада Д 55.051.04.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню наукової проблеми зниження рівня техногенного навантаження на довкілля від промислових викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини, що супроводжується комплексним негативним впливом на всі складові природні компоненти та спричинює порушення екологічної рівноваги довкілля.

Розроблено науково-методологічні основи системного підходу до зниження впливу техногенних викидів промислових виробництв, що містять дрібнодисперсні зважені речовини ($PM_{2.5}$). Здійснено обґрунтування розроблення математичної моделі поширення забруднюючих речовин, методики вибору природоохоронного обладнання та дослідження вискоелективних конструкцій пилоочисного обладнання.

З метою прогнозування й попередження наслідків техногенного навантаження від пилових викидів розроблено алгоритм та програмну реалізацію математичної моделі розрахунку поширення $PM_{2.5}$ у приземному шарі атмосфери. Розроблено Web-додаток розрахунку поширення забруднюючих речовин, що може використовуватися в системах моніторингу для оцінки й контролю техногенного впливу промислових підприємств на навколишнє природне середовище та інформування громадськості на різних рівнях.

Розроблено методики вибору пилогазоочисного обладнання 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.

На основі лабораторних досліджень запропоновано конструкції апаратів із регулярною пульсаційною насадкою (форсунковий та ежекційний типи), що забезпечують створення організованих вихрових зон у робочій зоні апарата й мають широкий діапазон стійкої роботи. Проведено дослідження та математичний опис механізмів осадження $PM_{2.5}$, що дозволяє проектувати конструкції апаратів для уловлення дрібнодисперсного пилу.

Практична значущість роботи підтверджена актами впровадження у виробничий процес вискоелективних конструкцій апаратів та методик аргументованого вибору ефективного природозахисного обладнання, прогнозування й розрахунку зони забруднення приземного шару атмосфери, а також використанням результатів досліджень у навчальному процесі.

Ключові слова: дрібнодисперсні речовини, моделювання розсіювання, програмний алгоритм, техногенне навантаження, екологічно безпечні технології.

ABSTRACT

Kozii I. S. Scientific foundations of the system approach to reducing the man-made load from industrial emissions on the environment. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Engineering Sciences Degree by specialty 21.06.01 – ecological safety. Sumy, Sumy State University, 2023. Specialized Academic Council D 55.051.04.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of reducing the artificial load on the environment from industrial emissions that contain finely dispersed suspended substances. These emissions have a complex negative impact on all-natural components of the environment and disrupt its ecological balance.

Work has developed the scientific and methodological foundations for a systematic approach to reducing the impact of artificial emissions from industrial productions containing finely dispersed suspended substances, specifically $PM_{2.5}$. Carried out the substantiation of developing a mathematical model of the spread of pollutants, the result of a methodology for selecting environmental protection equipment, and the study of highly efficient constructions of dust cleaning equipment.

To forecast and prevent the consequences of technogenic load from dust emissions, an algorithm and software implementation of a mathematical model for calculating the distribution of $PM_{2.5}$ in the surface layer of the atmosphere was developed. Created a web application for calculating the spread of pollutants, which can be used in monitoring systems to assess and control the artificial impact of industrial enterprises on the surrounding natural environment and to inform the public at various levels.

Developed methods for selecting dust and gas cleaning equipment using graph theory and the technique of sequential hierarchical clustering. The mechanism for choosing dust and gas cleaning equipment using the online service of electronic spreadsheets based on comparing parameters of three databases: characteristics of pollutants, technological conditions of the environment, and parameters of dust and gas cleaning equipment, was implemented in software.

Based on laboratory studies, designs of devices with a regular pulsation nozzle (nozzle and ejection type) are proposed, which ensure the creation of organized vortex zones in the working area of the device and have a wide range of stable operations. Carried out a study and mathematical description of $PM_{2.5}$ deposition mechanisms, which allows for designing devices for capturing fine dust.

Confirmed the practical significance of the work by the acts of introducing into the production process highly efficient designs of devices and methods of reasoned selection of effective environmental protection equipment, forecasting and calculation of the pollution zone of the surface layer of the atmosphere, as well as the introduction of research results into the educational process.

Key words: fine suspended substances, dispersion modeling, software algorithm, technogenic load, ecologically safe technologies.

Підписано до друку _____.2023.
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 2,3. Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.