

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

Петрушки Ігора Михайловича

на дисертаційну роботу Козія Івана Сергійовича

«Наукові основи системного підходу до зниження техногенного навантаження від промислових викидів на довкілля»,

представлену для здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека

Актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами. У зв'язку з обраним курсом на інтеграцію в європейську спільноту, Україна повинна дотримуватись певних екологічних стандартів безпеки та здійснювати екологічну політику з охорони навколишнього середовища на рівні міжнародних нормативних документів. Для цього необхідно розробляти та впроваджувати нові методики аналізу довкілля, створювати моніторингові системи, проводити науково-технічні дослідження та розробки природозахисного обладнання. Підприємства, що забруднюють навколишнє середовище, повинні впроваджувати екологічно орієнтовані технології, сучасні методики прогнозування рівня впливу від забруднюючих речовин та вискоєфективне пилогазоочисне обладнання для очищення пилогазових викидів.

Для зниження техногенного навантаження від пилових викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, необхідно використовувати комплексний підхід до проблем охорони довкілля та здоров'я населення. Цей підхід передбачає впровадження системи оптимальних природозахисних технологічних рішень, що включає оцінювання стану довкілля та вибір способів зниження техногенного навантаження промислових виробництв. Системний підхід є методологічною основою цього процесу, який можна використовувати для удосконалення системи «викиди виробництва – природозахисне обладнання – зниження техногенного навантаження на довкілля», аналізування проблем та прийняття управлінських рішень.

Дисертаційна робота Козія Івана Сергійовича спрямована на розроблення методологічного підходу до впровадження комплексного екологічного підходу щодо зниження техногенного навантаження на довкілля від промислових викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини (РМ_{2,5}).

Актуальність обраної теми підтверджується тим, що тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку передумов для ефективного запобігання, зменшення й контролю промислового забруднення в Україні на 2019–2028 рр. згідно з «Концепцією 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», та здійснювалась відповідно до наукової проблематики 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) та договору на розроблення і передавання науково-технічної продукції «Комплексні послуги у галузі екології для підприємств, установ та організацій» (№ 51.16-2019.СП/107).



Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на опрацюванні значного обсягу теоретичних та експериментальних досліджень, є логічно обґрунтованими і підтверджуються рекомендаціями до використання у виробництві, математичного моделювання. Достовірність результатів підтверджується також використанням сучасної вимірювальної техніки та методик обробки експериментальних даних.

Наукова новизна результатів, отриманих дисертантом, полягає в тому, що розроблено наукові основи до системного аналізу впливу викидів промислових підприємств, які містять дрібнодисперсні зважені речовини, на довкілля, у дисертації сформовано висновки та рекомендації, сукупність яких представляє нові науково обґрунтовані результати у галузі екологічної безпеки:

- 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, прогнозування забруднення довкілля, розробленням методик вибору природозахисного обладнання, дослідження і використання високоефективних конструкцій пилогазоочисного обладнання;

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

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

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

- вперше одержано математичну залежність для розрахунку діаметра крапель поглинальної рідини, утворюваних унаслідок дроблення рідинних потоків турбулізуючими елементами насадки в апараті з регулярною пульсаційною насадкою;

- вперше 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.

Оцінка висновків здобувача щодо значущості його роботи для науки і практики. Одержані дисертантом результати мають важливе значення для науки, оскільки вони сприяють розвитку науково-практичних аспектів управління екологічною безпекою у процесі прогнозування впливу від промислових викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини, на довкілля та розроблення науково обґрунтованого підходу до вибору і дослідження високоефективних конструкцій пилогазоочисного обладнання. **Наукова значимість роботи** полягає у розробленні наукових засад до вирішення проблем екологічної безпеки промислових

підприємств, зокрема, щодо розроблення комплексу науково обґрунтованих технологічних рішень та заходів із зменшення негативного впливу на довкілля викидів дрібнодисперсних зважених речовин на підставі результатів математичного моделювання процесу розсіювання та алгоритму вибору ефективного пилогазоочисного обладнання.

Практична значимість результатів роботи полягає у практичній реалізації алгоритму і математичної моделі для прогнозування розсіювання забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери. Програма розрахунку розсіювання дрібнодисперсних зважених речовин, може бути використана в системах моніторингу для оцінки та контролю техногенного впливу промислових підприємств на довкілля, а також для інформування громадськості на різних рівнях. Розроблено програмне рішення алгоритму вибору природоохоронного обладнання, що враховує різні фізичні особливості роботи обладнання та параметри забруднюючих речовин, що дозволяє вибирати ефективні технологічні природоохоронні рішення для зменшення техногенного впливу на довкілля відповідно до кількості викидів та технологічних умов середовища. Розроблено конструкції вискоефективних пилогазоочисних апаратів з регулярною пульсаційною насадкою – форсункового та ежекційного типів, які дозволяють створювати в робочій зоні апаратів організовані вихрові зони та забезпечують широкий діапазон стійкої роботи. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво вискоефективних пилогазоочисних апаратів для комплексного очищення викидів виробництва, а також методологію вибору пилогазоочисного обладнання та порядок розрахунку ефективності роботи апаратів із регулярною пульсаційною насадкою для очищення викидів від $PM_{2.5}$. Державною екологічною інспекцією в Сумській області використано рекомендації та математичну модель поширення забруднюючих речовин для прогнозування й розрахунку зони забруднення атмосферного повітря внаслідок викидів дрібнодисперсних зважених речовин.

Загальна характеристика структури і змісту дисертаційної роботи та реферату. Дисертація є завершеною науковою працею, повний обсяг якої становить 343 сторінки та складається з анотації, вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і 9 додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено наукову новизну й практичну цінність одержаних результатів, детально наведено особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру та обсяг роботи.

У *першому розділі* здобувачем проведено аналіз літературних джерел та визначено основні напрямки зниження техногенного навантаження від промислових викидів, які містять дрібнодисперсні зважені речовини. Для зниження техногенного навантаження від викидів, що містять дрібнодисперсні зважені речовини, здобувачем використано комплексний підхід до проблеми охорони довкілля та здоров'я населення. Проведено аналіз законодавчої бази України, який підтвердив необхідність системної роботи зі створення та вдосконалення національної системи зниження викидів забруднюючих речовин, що відповідає вимогам Європейського Союзу щодо охорони атмосферного повітря. Реалізація запропонованого підходу передбачає розроблення та впровадження сучасних моніторингових систем, засобів інформування громадськості, методик

обґрунтованого вибору пилоочисного обладнання та використання на виробництві високоефективних пилоочисних апаратів.

Здобувачем наведено класифікацію дрібнодисперсних зважених речовин, яка враховує фізико-хімічні властивості, такі як злипливість частинок, гігроскопічність та їхня здатність сорбувати додаткові речовини з навколишнього природного середовища. Врахування цих властивостей є важливим під час вибору ефективного пилогазоочисного обладнання та розробки технологічних рішень для зменшення негативного впливу викидів на довкілля.

На підставі аналізу бази даних Організації економічного співробітництва та розвитку щодо викидів дрібнодисперсних частинок $PM_{2.5}$ в Україні 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.

Згідно з проведеним літературним оглядом інформація про стан довкілля може бути отримана під час моделювання та прогнозування поширення забруднюючих речовин, що має великий вплив на доцільність та ефективність природоохоронних заходів.

З метою зниження техногенного навантаження на довкілля від викидів з дрібнодисперсними зваженими речовинами рекомендується використовувати високоефективні пилогазоочисні апарати з великою питомою продуктивністю. Аналіз різних способів інтенсифікації інерційно-дифузійних процесів показує, що інтенсивний режим розвиненої турбулентності може бути доцільно використовувати в апаратах з регулярною пульсаційною насадкою.

У *другому розділі* наведено загальну схему системного аналізу для вирішення поставлених задач дослідження, зокрема визначено систему «викиди виробництва – природозахисне обладнання – зменшення техногенного навантаження на довкілля», що дозволяє проводити аналіз проблеми і розробляти рекомендації у процесі ухвалення управлінських рішень. Методика та методи проведення системного аналізу зорієнтовані на застосування математичного моделювання розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері, дослідження впливу дрібнодисперсних зважених речовин на здоров'я людини, використання аналітичних методів для дослідження процесів взаємодії пилогазового потоку з рідиною, а також методи дослідження ефективності роботи апарата.

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 промислових виробництв. Встановлено, що середній розмір частинок пилу двоокису титану становить 0,3 мкм, і вимагає подальшого дослідження питання зниження негативного впливу на довкілля.

Було встановлено, що метод дослідження алгоритму вибору природоохоронного обладнання базується на синтезі даних з різних джерел, таких як: параметри забруднюючих речовин, технологічні умови процесу та параметри природоохоронного обладнання.

Наведено опис лабораторного стенду з регулярною пульсаційною насадкою для дослідження гідродинаміки та пиловловлення. Для запобігання можливих похибок всі вимірювальні прилади, які були використані під час проведення досліджень, пройшли перевірку та калібрування, а також мають відповідні сертифікати.

У *третьому розділі* було проведено дослідження впливу викидів $PM_{2.5}$ на здоров'я населення в Україні та встановлено зв'язок між обсягами викидів та кількістю випадків захворювань системи кровообігу. Отримані результати дослідження вказують на необхідність розроблення заходів щодо зниження викидів $PM_{2.5}$ в приземному шарі атмосфери. Для зменшення техногенного впливу від викидів $PM_{2.5}$ запропоновано технічні та інструментальні засоби, прогнозування поширення викидів і реалізація громадського контролю через інформування громадськості на різних рівнях.

Згідно з завданнями на шляху до євроінтеграції законодавчо-нормативної бази України було розроблено модель поширення дрібнодисперсних зважених забруднюючих речовин в атмосфері. Для побудови математичної моделі було використано тривимірне рівняння поширення домішок у турбулентному середовищі, що дозволило отримати кінцевий алгоритм моделювання.

Для розв'язування вихідного рівняння було виконано ряд припущень, умови параметризації – нормування параметрів і функцій, нормування початкових та граничних умов, а потім – нормування коефіцієнтів параметризованої системи. В результаті було отримано функцію розподілу домішок у приземному шарі атмосфери.

В рефераті і дисертації наведено візуальні результати чисельного моделювання у вигляді тривимірних і двовимірних візуалізацій у математичному середовищі PTC Mathcad Prime 7. Для оцінки адекватності математичної моделі було проведено кореляційний аналіз між розрахунковими значеннями та експериментальними даними. Кореляція між даними математичної моделі та експериментальними даними показала збіжність результатів на рівні 97%, що свідчить про більшу адекватність математичної моделі порівняно з методикою ОНД-86.

Здобувачем розроблено Web-додаток для оцінювання дальності поширення забруднюючих речовин від джерела їх викидів, який 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.

Установлено, що для забезпечення умов сталого розвитку потрібно впроваджувати раціонально-обґрунтовані технології й високоефективне обладнання.

У *четвертому розділі* автором реалізовано системний підхід до обґрунтованого вибору ефективного природозахисного обладнання. Проблема належного вибору оптимального обладнання для пилогазоочистки полягає у необхідності враховувати параметри забруднюючих речовин, а також технологічні умови середовища, в якому проводиться процес очищення. Було сформовано вихідні бази даних характеристик забруднюючих речовин, параметрів обладнання і технологічних умов проведення процесу очищення, наведено алгоритми взаємодії блоків цих даних між собою.

За допомогою алгебри висловлень була сформульована послідовність та спадковість роботи алгоритмічної програми для розрахунку оптимального вибору природозахисного обладнання на основі параметрів забруднюючих речовин та технологічних умов середовища проведення процесу очищення. Було розроблено алгоритм мережевої моделі для вибору обладнання.

Метод послідовної ієрархічної кластеризації був використаний для розроблення програмного застосунку алгоритму вибору природоохоронного обладнання. Для полегшення користування програмним алгоритмом вибору природоохоронного обладнання з метою зниження викидів у повітря було розроблено онлайн-сервіс, який доступний через Google-Таблиці. Програма є доступною для використання на комп'ютерах з підтримкою файлів у форматі *.xlsx або в онлайн-режимі і має ряд переваг. Зокрема, вона є зручною та швидкою у роботі, дає можливість доповнення баз даних забруднюючих речовин та природоохоронного обладнання, і доступна для широкого кола користувачів.

У *п'ятому розділі* з метою підвищення рівня екологічної безпеки проведено теоретичні й практичні дослідження гідродинаміки та механізмів пиловловлювання в апаратах з регулярною пульсаційною насадкою. На основі проведених лабораторних досліджень були розроблені конструкції апаратів форсункового та ежекційного типів. Обидві розроблені конструкції апаратів працюють у прямоточному режимі, що дозволяє досягати інтенсивної взаємодії фаз з дробленням та коагуляцією крапель рідини, забезпечуючи постійне оновлення поверхні осадження.

Високі показники ефективності пиловловлення розроблених конструкцій ежекційного та форсункових апаратів з регулярною пульсаційною насадкою (99,4 – 99,6%) забезпечуються за рахунок оптимальних параметрів роботи та наявності турбулізувальних елементів, які допомагають дрібнодисперсному пилу захоплюватися вихорами в рідину та утворювати більш крупні частки, які легше затримуються в апараті. Ці показники можуть є дуже важливими для промислових підприємств, які потребують високої ефективності пиловловлення для безпечних умов праці та дотримання нормативів забруднення довкілля.

Проведено математичний аналіз механізмів коагуляції та конденсації для підвищення розміру дрібнодисперсних зважених речовин у конструкціях апаратів з регулярною пульсаційною насадкою. Отримано залежності для розрахунку діаметру крапель, які утворюються в результаті дроблення рідинних потоків турбулізуючими елементами в верхній частині апарату. Розроблена модель взаємодії зважених частинок речовини в одиничному вихорі.

Проведено дослідження механізмів осадження дрібнодисперсних зважених речовин, які уловлюються краплинами рідини в апараті з регулярною пульсаційною насадкою, з урахуванням дисперсного складу твердих частинок. За результатами розрахунків встановлено, що мінімальний ефективний діаметр зважених частинок складає 0,3 мкм, що свідчить про можливість успішної роботи з різноманітними видами пилогазових викидів промислових підприємств, що містять дрібнодисперсні зважені речовини.

Висновки відображають хід розв'язання поставлених у роботі завдань, містять основні результати дисертаційного дослідження, які достатньо повно характеризують науково-практичні досягнення дисертанта.

Список використаних джерел містить 398 найменування за темою дисертаційної роботи та достатньою мірою відображає інформацію за темою дослідження, що виконував здобувач.

Оформлення дисертації за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим МОН України, наказ №40 від 12 січня 2017 року. Мова і стиль викладання дисертації і реферату чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати, визначені метою досліджень.

Повнота викладення результатів дисертації у наукових фахових виданнях. Основні положення дисертації опубліковано у 44 наукових працях, 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.

Наведений у публікаціях матеріал повною мірою відображає основні результати та обґрунтовує наукові положення дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на 17 профільних конференціях всеукраїнського й міжнародного рівня.

Шляхи використання наукових і практичних результатів роботи і ступінь їх реалізації. Практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво двох типів вискоєфективних 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.).

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.

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.).

Ідентичність змісту реферату основним положенням дисертації.

Зміст реферату відповідає розділам дисертації та її основним положенням.

Дисертація є одноособово створеною кваліфікаційною науковою працею, яка містить сукупність результатів та наукових положень, поданих автором для публічного захисту, має внутрішню єдність і свідчить про особистий внесок автора в науку. У дисертації та рефераті не виявлено ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації.

Тематика досліджень відповідає паспорту спеціальності 21.06.01 – екологічна безпека, зокрема пунктам «Обґрунтування теоретичних основ оцінок техногенного ризику, розробка та пошук за їх допомогою оптимальних форм управління екологічною безпекою», «Розробка наукових методів дослідження комплексної оцінки та прогнозування впливу техногенного забруднення на навколишнє середовище та людину», «Удосконалення існуючих, створення нових екологічно безпечних технологічних процесів та устаткування, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів, додержання нормативів шкідливих впливів на довкілля». Наведені результати визначають технічне спрямування дисертаційної роботи.

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації та реферату:

1. На мою думку, в літературному огляді недостатньо представлено вітчизняні дослідження за темою дисертації.

2. Наведення рис. 1.5, на думку опонента, є недоцільним, інформацію, що відображена в діаграмі, можна зазначити у тексті.

3. В п. 1.8.1 наведено, що з використанням звукових пульсацій підвищується ефективність осадження дрібнодисперсних зважених речовин. Чому автор не розглядав це питання детальніше під час експериментальних досліджень?

4. На рис. 2.1 варто було в зазначити нумерацію етапів системного аналізу для вирішення поставленої проблеми.

5. Яким чином проводились дослідження механічних властивостей пилу двоокису титану (розривна міцність, кути природнього відкосу статичний і динамічний, крайовий кут змочування)?

6. Отримані результати у четвертому розділі бажано представити у вигляді методичних рекомендацій для використання розробленого алгоритму вибору пилогазоочисного обладнання та визначення першочерговості заходів із захисту атмосферного повітря.

7. Графіки, див. рис. 5.9, 5.10, доцільно було б апроксимувати і отримати емпіричні залежності ефективності роботи від параметрів, що є визначними.

8. По тексті дисертації та реферату є певні орфографічні та синтаксичні недоліки. Не всі одиниці у дисертації виражені в системі СІ (т, мг/м³, мкм, мг тощо).

Вказані недоліки не впливають на обґрунтованість положень наукової новизни та позитивний характер одержаних у роботі наукових результатів, висновків і практичних рекомендацій.

Загальні висновки.

Дисертаційна робота Козія Івана Сергійовича виконана на рівні вимог до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук відповідно до п.п. 7, 8, 9 пп. «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук»,

затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №1197 від 17 листопада 2021 р. Дисертація є завершеною науковою працею, що спрямована на розроблення науково-методологічного підходу до впровадження комплексного рішення щодо зменшення впливу на довкілля викидів промислових підприємств, які містять дрібнодисперсні зважені речовини. Практична реалізація отриманих дисертантом результатів дозволить підвищити рівень екологічної безпеки промислових підприємств.

На основі вищезазначеного можна дійти висновку, що Козій Іван Сергійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри екологічної безпеки
та природоохоронної діяльності
Національного університету
«Львівська політехніка»



Ігор ПЕТРУШКА

Підпис Петрушки І. М.
ЗАСВІДЧУЮ: Вчений секретар



Роман БРИЛИНСЬКИЙ