

ВІДГУК

рецензента, кандидата фізико-математичних наук, доцента

Ламтюгової Світлани Миколаївни

на дисертаційну роботу

Ковтуна Артема Дмитровича

«Математичне моделювання забруднення навколишнього середовища

з використанням інтерлінації функцій»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 113 Прикладна математика

галузі знань 11 Математика та статистика

1. Актуальність теми дослідження

Стан довкілля в індустріальних регіонах України продовжує погіршуватися внаслідок систематичних викидів промислових підприємств, транспорту та сільськогосподарського виробництва. Забруднення атмосфери газоподібними сполуками та накопичення важких металів і токсичних органічних речовин у ґрунтах створює реальні ризики для агроєкосистем, якості харчової продукції та здоров'я населення. За таких умов розробка інструментів для кількісного опису й прогнозування динаміки забруднювачів набуває не лише теоретичного, а й безпосереднього прикладного значення, зокрема, для органів екологічного контролю та землекористування.

Слід враховувати обмеженість можливостей прямого моніторингу довкілля: мережі спостережних станцій, як правило, є розрідженими, дані вимірювань – фрагментарними та нерегулярно розподіленими у просторі, а проведення повномасштабних натурних експериментів пов'язане зі значними витратами і потенційною небезпекою. Відповідно, зростає роль обчислювальних методів, здатних відтворювати картину забруднення там, де прямі вимірювання відсутні або недостатні, саме цій проблематиці і присвячена дисертаційна робота.

Не менш важливим є суто математичний аспект. Задачі конвективно-дифузійно-реакційного перенесення речовин із локалізованими джерелами належать до класу несамопряжених крайових задач, для яких застосування

класичних варіаційних схем є некоректним без попередньої редукції постановки. Водночас відновлення багатовимірних полів за розрідженими та нерегулярно розташованими вимірюваннями вимагає розвитку апарату інтерлінації й узагальненої інтерполяції з урахуванням локальної геометрії точок спостереження.

Отже, тема дисертаційної роботи Ковтуна А. Д. відповідає актуальним запитам як екологічної практики, так і теорії чисельних методів та математичного моделювання, а її розробка становить самостійний науковий інтерес.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

Аналіз дисертаційної роботи Ковтуна Артема Дмитровича дозволяє зробити висновок про високий ступінь обґрунтованості та достовірності висунутих наукових положень, сформульованих висновків і наданих практичних рекомендацій. Обґрунтованість результатів дослідження забезпечується поєднанням сучасних апаратів прикладної математики, строгих математичних доведень та системного обчислювального експерименту.

Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано його мету, об'єкт і предмет дослідження, розкрито наукову новизну отриманих результатів, їх практичну цінність та наведено дані про апробацію та публікації за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі наведено огляд і систематизацію існуючих підходів до математичного моделювання процесів поширення домішок у повітряному та ґрунтовому середовищах. Проаналізовано традиційні чисельні методи та методи наближення і відновлення полів за дискретними та лінійними даними. Обґрунтовано доцільність застосування апарату інтерлінації функцій багатьох змінних для вирішення проблеми дефіциту та нерегулярності вихідних моніторингових даних.

У другому розділі побудовано та досліджено математичні моделі перенесення та трансформації забруднюючих речовин у навколишньому середовищі. Запропоновано розмежування повної несамоспряженої конвективно-дифузійно-реакційної моделі (у слабкій формі Гальоркіна) та її редукованої самоспряженої частини (у варіаційній формі Рітца) з використанням концепції локального потенціалу Глансдорфа-Пригожина. Отримано варіаційні постановки задач для оцінки просторово-часового розподілу концентрацій шкідливих речовин.

Третій розділ присвячений розробці та вдосконаленню математичного апарату інтерлінації функцій багатьох змінних шляхом поєднання локальних інтерлінаційних операторів із триангуляцією області та барицентричним зважуванням. Доведено теореми про властивості запропонованих операторів, отримано інтегральні зображення залишку та теоретичні оцінки похибки наближення. Розроблено чисельні алгоритми побудови відновлювальних поверхонь за лінійною інформацією (даними вимірювань уздовж ліній/профілів спостереження).

Четвертий розділ присвячений чисельній перевірці математичних моделей, розроблених у другому та третьому розділах, за допомогою двох обчислювальних сценаріїв: скінченно-елементного моделювання перенесення CO_2 та SO_3 у повітрі методом Гальоркіна/Ньютона та реконструкції тривимірного поля забруднення ґрунту за 64 вертикальними профілями моніторингу. Для повітряної моделі підтверджено коректність варіаційної постановки й стійку збіжність нелінійного розв'язку (5 ітерацій Ньютона), а для задачі реконструкції ґрунту порівняно профільну інтерлінацію з класичним і модифікованим методами Шепарда за трьома показниками похибки. Результати показали, що інтерлінаційний підхід забезпечує найменшу похибку і краще відтворює локальні піки забруднення порівняно з методами Шепарда, що підтверджує теоретичні висновки попередніх розділів.

Підсумкова частина дисертаційної роботи містить узагальнення результатів вирішення сформульованого науково-прикладного завдання та систематизацію основних наукових здобутків, отриманих автором у ході дослідження. Порівняння змісту анотації з текстом роботи показує їхню повну

відповідність – анотація адекватно відображає структуру дисертації, її ключові наукові положення та висновки.

Подана дисертаційна робота виконана здобувачем самостійно й базується на всебічному аналізі значної кількості наукової літератури, а також на опрацюванні великого обсягу вихідних даних. За своїм науковим та методичним рівнем робота задовольняє вимоги, встановлені Міністерством освіти і науки України, а сформульована назва дисертації повністю узгоджується зі змістом проведеного дослідження.

3. Достовірність та новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується: коректним використанням апарату теорії диференціальних рівнянь, варіаційного числення та методу скінченних елементів; строгим математичним обґрунтуванням застосування слабкої форми Гальоркіна для несамоспряжених задач та методу Рітца для редукованих моделей; узгодженістю отриманих чисельних результатів із фізичним змістом процесів масоперенесення та відомими фундаментальними законами хімічної кінетики і гідродинаміки; стійкістю та збіжністю розробленого двоступеневого алгоритму МСЕ/Ньютона.

Наукова новизна сформульованих результатів дослідження розкривається в наступних пунктах:

- вперше запропоновано концепцію узгодженого розділення повної конвективно-дифузійно-реакційної моделі та редукованої самоспряженої дифузійно-реакційної постановки для задач поширення двокомпонентної суміші забруднювачів у повітряному середовищі від локалізованих трубчастих джерел;
- вперше строго обґрунтовано математичну правомірність застосування варіаційних підходів, за якою повна конвективно-дифузійно-реакційна модель розглядається у слабкій постановці Гальоркіна, тоді як метод Рітца коректно застосовується лише до її редукованої самоспряженої дифузійно-реакційної частини;

– вперше побудовано двоступеневу редуковану скінченно-елементну схему, в якій нелінійна задача для другої компоненти забруднювачів розв’язується модифікованим методом Ньютона, а концентрація першої компоненти визначається з лінійної системи скінченно-елементних рівнянь на основі вже знайденого профілю другої компоненти;

– дістали подальший розвиток методи інтерлінації функцій багатьох змінних та відповідні чисельні схеми в частині їх розширення та систематичного застосування до задач реконструкції просторових полів забруднення ґрунту за неповними й дискретними даними спостережень;

– удосконалено метод інтерлінації функцій багатьох змінних шляхом поєднання локальних інтерлінаційних операторів із триангуляцією розрахункової області та барицентричним зважуванням, що забезпечує високу точність реконструкції просторових полів забруднення ґрунту за нерегулярно розміщеними й неповними даними з урахуванням локальної геометрії їх розташування (це дало змогу зменшити середню похибку реконструкції порівняно з традиційними схемами інтерполяції та підвищити стійкість відновлення).

4. Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Усі наукові результати дисертації отримані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, у дисертаційній роботі використані лише ті ідеї та положення, що є особистим здобутком автора. У вступі зазначений авторський внесок у публікації зі співавторами.

Основні результати дисертаційної роботи та усі елементи наукової новизни опубліковані у 15 наукових роботах, з яких одна робота опублікована у виданні, зазначеному в переліку наукових фахових видань України (категорія Б); дві публікації у закордонних виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, одна стаття опублікована у науковому виданні, що додатково відображає результати дослідження, та 11 тез доповідей, опублікованих у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

5. Значущість дослідження для науки і практики та шляхи його використання

Теоретична цінність дисертаційної роботи обумовлена розробкою нового методологічного підходу до побудови узгоджених редукованих скінченно-елементних схем для складних нелінійних систем диференціальних рівнянь масоперенесення; математичним доведенням коректності розділення загальної несамопряженої моделі на часткові підзадачі з метою застосування оптимізованих чисельних методів (МСЕ, модифікованого методу Ньютона та методу Рітца); удосконаленням математичного інструментарію відновлення функціональних залежностей багатьох змінних за дискретними та хаотично розташованими експериментальними даними.

Практична цінність одержаних результатів полягає у створенні прикладного обчислювального алгоритму для оперативного розрахунку поширення двокомпонентних газових сумішей від промислових джерел труби; алгоритму інтерлінації з барицентричним зважуванням, що забезпечує зменшення похибки реконструкції просторових полів забруднення ґрунту при мінімізації витрат на польові та лабораторні вимірювання.

Результати проведеного здобувачем дисертаційного дослідження можуть бути впроваджені в навчальний процес у закладах вищої освіти при викладанні дисциплін з математичного моделювання, чисельних методів та обчислювальної екології, а також використані у спеціалізованих ПС-системах екологічного спрямування.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

Детальний аналіз тексту дисертації та наукових праць здобувача засвідчує відсутність будь-яких ознак порушення принципів академічної доброчесності, зокрема академічного плагіату, самоплагіату, фальсифікації чи фабрикації даних. Здобувач продемонстрував високу академічну культуру, надавши об'єктивну та перевірювану інформацію стосовно отриманих результатів, використаних математичних методик і вихідних даних дослідження.

7. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертаційної роботи і її окремих положень

Дисертація є безумовно цікавою практично спрямованою науковою працею, але не позбавлена деяких недоліків. Серед них хочу зазначити наступне.

1) В описі математичної моделі забруднення повітря (другий розділ) на стор. 66 вводиться вибір компонент домішок-забруднювачів. Доцільніше було б розширити фізико-хімічне та екологічне обґрунтування вибору саме суміші вуглекислого газу та оксиду сірки як об'єктів дослідження у цьому розділі.

2) У четвертому розділі чисельну перевірку точності проведено для ідеалізованих (точних) вихідних даних, тоді як для практичного застосування запропонованого підходу варто було б додатково дослідити стійкість інтерлінаційних операторів за наявності випадкового шуму вимірювань.

3) У списку використаних джерел доцільно було б дотриматися єдиного принципу впорядкування літератури (наприклад, суворо за послідовністю першої згадки в тексті або в алфавітному порядку), оскільки спостерігаються поодинокі відхилення від цієї системи, наприклад, на стор. 25, 29.

4) У висновках (стор. 175) стверджується, що геостатистичні та ГІС/ДЗЗ методи є малопродуктивними через надмірні обчислювальні витрати. Це було б бажано підкріпити конкретним кількісним порівнянням обчислювальної складності чи часу розрахунку.

5) У тексті дисертаційної роботи подекуди зустрічаються орфографічні та граматичні помилки.

Зроблені зауваження не впливають на загальне позитивне враження від роботи та на значущість отриманих в ній результатів.

8. Загальна оцінка роботи, її відповідність встановленим вимогам

Вважаю, що дисертаційна робота Ковтуна Артема Дмитровича «Математичне моделювання забруднення навколишнього середовища з використанням інтерлінації функцій», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика галузі знань 11 Математика та статистика, є актуальною, завершеною науковою працею, що виконана на високому науково-теоретичному рівні з логічно та

доступно викладеним матеріалом. Вона присвячена розв'язанню важливої науково-прикладної проблеми, що полягає у побудові нових математичних моделей масоперенесення, їх варіаційному обґрунтуванні, створенні двоступеневих чисельних схем (МСЕ–Ньютон) та розробці ефективного апарату інтерлінації функцій для відтворення просторової структури полів забруднення ґрунтового покриву.

Дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності 113 Прикладна математика та задовольняє вимоги пунктів 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами), а здобувач Ковтун Артем Дмитрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з прикладної математики.

Рецензент:

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

доцент кафедри прикладної математики

Харківського національного університету радіоелектроніки

Міністерства освіти і науки України

Світлана ЛАМТЮГОВА