

ВІДГУК

рецензента, кандидата фізико-математичних наук

Славіка Олексія Валерійовича

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

Проблема техногенного забруднення довкілля залишається однією з ключових у сфері екологічної безпеки та раціонального природокористування. Промислово розвинені регіони України зазнають тривалого антропогенного навантаження внаслідок діяльності металургійних, хімічних, нафто- та газопереробних підприємств, енергетики й транспорту, а також інтенсивного застосування агрохімікатів. Накопичення важких металів, стійких органічних сполук і надлишкових азотовмісних речовин у ґрунтового покриві становить пряму загрозу продовольчій безпеці, стану екосистем і здоров'ю населення, що визначає практичну значущість задач кількісної оцінки та прогнозування рівня забруднення.

Безпосереднє натурне дослідження процесів розповсюдження забруднювачів часто є технічно й економічно недоцільним або взагалі неможливим через тривалість процесів, небезпечність для здоров'я людини й високу вартість вимірювального обладнання. Це обумовлює провідну роль методів математичного моделювання та обчислювального експерименту як основного інструменту аналізу таких процесів.

Наявні підходи до чисельного розв'язання крайових задач конвективно-дифузійно-реакційного перенесення забруднювачів, а також методи відновлення просторових полів за неповними й нерегулярно розміщеними даними

спостережень, попри значні досягнення в цій галузі, не утворюють цілісної узгодженої методології, яка б поєднувала коректну варіаційну постановку скінченно-елементних схем із сучасним апаратом інтерлінації та узагальненої інтерполяції функцій багатьох змінних.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Ковтуна А. Д. є актуальною як з наукової точки зору – у частині розвитку теорії скінченно-елементних схем для задач конвективно-дифузійно-реакційного перенесення та методів інтерлінації функцій, так і з практичної, оскільки отримані результати можуть бути безпосередньо застосовані для моніторингу й прогнозування стану повітряного та ґрунтового середовищ, побудови карт забруднення та підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки.

2 Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

Ознайомлення з дисертаційним дослідженням Ковтуна А. Д. свідчить про належний рівень наукової обґрунтованості та достовірності представлених результатів, висновків і практичних пропозицій автора. Достовірність отриманих даних підтверджується вдалим поєднанням сучасного апарату прикладної математики, коректних математичних доведень та ретельно проведеного обчислювального експерименту.

Структурно робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел, що складається з 137 найменувань та п'яти додатків.

У вступній частині автор переконливо обґрунтовує актуальність обраної теми, чітко формулює мету, об'єкт і предмет дослідження, розкриває наукову новизну здобутих результатів та їхнє практичне значення, а також наводить відомості щодо апробації роботи й наявних публікацій.

Перший розділ присвячено огляду та узагальненню наявних наукових підходів до математичного моделювання процесів розповсюдження домішок у повітряному середовищі та забруднення ґрунтового середовища важкими

металами. Автором розглянуто класичні чисельні методи, а також підходи до наближення й відновлення полів на основі дискретних і лінійних вимірювань.

Підкреслено, що апарат інтерлінації функцій є природним математичним засобом для розв'язання поставленої задачі екологічного моніторингу забруднення ґрунту, оскільки він заснований на використанні слідів функцій уздовж заданої системи ліній (профілів спостереження).

У другому розділі побудовано та математично обґрунтовано одновимірну математичну модель конвективно-дифузійного перенесення й реакції двокомпонентної суміші газів з точковими джерелами та крайовими умовами Робіна. Для її чисельної реалізації розроблено двоступеневу схему МСЕ на основі слабкої форми Гальоркіна та методу Ньютона з подальшою L^2 -проекцією для відновлення потоків.

Третій розділ присвячений розробці та обґрунтуванню математичних методів (поліноміальної та сплайнової інтерлінації, а також узагальнених формул Шепарда та Литвина) для відновлення тривимірного поля забруднення ґрунту за даними, зібраними на окремих вертикальних профілях спостережень. Наведено теореми про властивості й точність побудованих операторів як для регулярно, так і для нерегулярно розміщених пунктів відбору проб, що створює основу для подальшого порівняльного чисельного аналізу методів реконструкції.

У четвертому розділі впроваджено дворівневу редуковану схему скінченних елементів з використанням модифікованого методу Ньютона. Виконано низку обчислювальних експериментів, пов'язаних із моделюванням поширення атмосферних викидів, а також картуванням забруднення ґрунтів важкими металами. Порівняльний аналіз запропонованих методів інтерлінації з традиційними підходами (зокрема, методом Шепарда) продемонстрував їхню вищу точність і стабільність при відновленні полів за неповною інформацією. На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження розробленого математичного та програмного забезпечення в системи екологічного моніторингу.

Науковий та методичний рівень дисертації відповідає встановленим вимогам Міністерства освіти і науки України, а її назва точно та повно відображає суть проведеного дослідження.

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

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю обраного математичного апарату (теорії диференціальних рівнянь, варіаційного числення та МСЕ) та фундаментальним обґрунтуванням вибору методів Гальоркіна і Рітца залежно від властивостей операторів задач. Отримані результати є вірогідними, оскільки повністю відповідають фізиці процесів аерогідродинаміки та хімічної кінетики, а розроблена чисельна схема МСЕ–Ньютона демонструє стійкість та збіжність розв'язків.

Наукова новизна сформульованих у роботі результатів полягає у такому:

1. Вперше висунуто та реалізовано концепцію узгодженого розділення сукупності рівнянь перенесення двокомпонентної газової суміші від точкових джерел на повну конвективно-дифузійно-реакційну задачу та її редукований дифузійно-реакційний аналог;

2. Вперше доведено математичну доцільність застосування слабкої форми Гальоркіна для повної (несамоспряженої) моделі масоперенесення та встановлено межі коректного використання методу Рітца виключно для її редукованого (самоспряженого) фрагмента;

3. Вперше побудовано розрахунковий алгоритм МСЕ, де обчислення нелінійного профілю другої компоненти виконується за допомогою модифікованої процедури Ньютона, після чого розподіл першої компоненти знаходиться з лінійної системи МСЕ;

4. Подальшого розвитку набуло застосування математичного апарату інтерлінації функцій та відповідних чисельних алгоритмів для розв'язання задач відновлення просторового розподілу забруднювачів у ґрунті за умов дефіциту й дискретності експериментальних даних;

5. Модифіковано метод інтерлінації функцій багатьох змінних шляхом його інтеграції з триангуляційними сітками та барицентричним зважуванням, що забезпечило підвищену точність і робастність реконструкції полів забруднення ґрунту на основі хаотично розташованих точок спостереження.

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

Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Наукові результати, що виносяться на захист, одержані автором одноосібно. Праці, написані у співавторстві, залучені до тексту дисертації лише в частині особистого доробку здобувача, що конкретизовано у вступній частині роботи.

Апробація та опублікування результатів дослідження є достатніми. За темою дисертації опубліковано 15 наукових праць, які повністю розкривають її зміст та наукову новизну, зокрема: 1 праця – у вітчизняному фаховому виданні категорії «Б»; 2 статті – у закордонних виданнях, які входять до бази Scopus; 1 стаття – у спеціалізованому науковому виданні (як додаткова публікація); 11 апробаційних матеріалів – у збірниках тез доповідей міжнародних наукових конференцій та форумів.

5 Значущість дослідження для науки і практики та шляхи його використання

Наукова значущість результатів дослідження полягає у розширенні математичного апарату чисельного моделювання нелінійних зв'язаних задач конвективно-дифузійного перенесення з хімічною взаємодією та точковими/локалізованими джерелами; теоретичному обґрунтуванні умов розмежування використання варіаційних методів (Гальоркіна та Рітца) залежно від властивостей симетрії та самоспряженості операторів диференціальних моделей; подальшому розвитку теорії інтерлінації функцій багатьох змінних шляхом її інтеграції з елементами триангуляції та барицентричного зважування для відновлення багатовимірних полів за неповними даними.

Практична значущість отриманих результатів полягає у тому, що: розроблені двоступеневі скінченно-елементні алгоритми та обчислювальні схеми дозволяють проводити високоточний розрахунок і прогнозування просторового розподілу концентрацій шкідливих викидів у повітряному середовищі; запропоновані модифіковані класи інтерлінаційних операторів є ефективним інструментом для побудови цифрових карт забруднення ґрунтів важкими металами та іншими токсикантами за умов обмеженої кількості точок спостереження.

Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення може бути використане підрозділами екологічного моніторингу, службами цивільного захисту та науково-дослідними організаціями при оцінці техногенного навантаження на довкілля та прийнятті управлінських рішень.

6 Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

Представлена до захисту дисертаційна робота повністю відповідає нормам чинного законодавства України про авторське право і суміжні права. На всі використані у тексті джерела інформації, ідеї та результати інших дослідників подано належні та точні посилання.

Аналіз дисертації та наукових публікацій, у яких висвітлено основні наукові результати здобувача, не дає підстав стверджувати про допущення автором порушень академічної доброчесності, зокрема таких як академічний плагіат, самоплагіат, фабрикація чи фальсифікація.

Здобувач надав повністю достовірну інформацію про результати власної наукової діяльності, застосовані методики чисельних і теоретичних досліджень, а також первинні джерела інформації.

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

Незважаючи на загальну високу оцінку якості роботи, вважаю за доцільне надати наступні зауваження та звернути увагу на такі дискусійні положення:

1) в описі математичної моделі забруднення повітря (розділ 1) варто було б чіткіше деталізувати фізичний зміст заданих крайових умов на зовнішніх межах області, а також явним чином вказати їхню класифікацію у варіаційній формі методу скінченних елементів;

2) при описі точкових джерел викидів через δ -функцію Дірака (п. 2.1, на с. 67–69) та їх подальшій реалізації у скінченно-елементній схемі варто було б докладніше зупинитися на питанні точності наближення розв’язку в безпосередньому околі джерела (тут природно виникає локальне зниження гладкості розв’язку, і варто було б чіткіше пояснити, яким чином це враховано або компенсовано);

3) для підвищення переконливості теоретичних результатів розділу 3 доцільно було б розширити чисельний експеримент у розділі 4 та надати порівняльний аналіз не лише для кусково-лінійного оператора, а й для операторів вищих порядків точності (зокрема кусково-квадратичного за методом Зламала);

4) в розділі 3 варто було б навести теоретичні оцінки часової складності алгоритму побудови просторових сіток і барицентричної вагової обробки у 3D-просторі;

5) у переліку публікацій (с. 7, с. 14 та повторно в Додатку А на с. 197) прізвище співавтора вказано як «Ковтун А. В.» замість правильного «Ковтун А. Д.»

Проте наведені зауваження не змінюють загальної позитивної оцінки результатів дисертаційної роботи, а лише підкреслюють багатогранність тематики та можуть стати основою для подальших досліджень.

8 Загальна оцінка роботи, її відповідність встановленим вимогам

Подана до захисту дисертаційна робота Ковтуна Артема Дмитровича «Математичне моделювання забруднення навколишнього середовища з використанням інтерлінації функцій» (спеціальність 113 Прикладна математика, галузь знань 11 Математика та статистика) є актуальним, завершеним дослідженням, якому властиві солідне теоретичне підґрунтя, чітка

структурованість та переконливість викладених результатів. Роботу вирізняють упорядкована структура, послідовна логіка розв'язання поставлених завдань та детальне обґрунтування застосованої методології.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми – створення й обґрунтування нових математичних моделей, варіаційних формулювань, чисельних алгоритмів на основі методу скінченних елементів та модифікованого методу Ньютона, а також удосконалених операторів інтерлінації для побудови й аналізу просторових полів забруднення ґрунту. Виклад матеріалу вирізняється науковою грамотністю та строгим стилем.

Зважаючи на актуальність обраної проблематики, наукову новизну, високий рівень обґрунтованості та достовірності здобутих результатів, а також їхнє суттєве практичне значення, можна впевнено стверджувати, що дисертаційна робота повністю відповідає вимогам спеціальності 113 Прикладна математика. Дисертація задовольняє положення 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, внесеними постановами КМУ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор, Ковтун Артем Дмитрович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з прикладної математики

Рецензент:

кандидат фізико-математичних наук,
асистент кафедри прикладної математики
Харківського національного
університету радіоелектроніки

Олексій СЛАВІК

Підпис Олексія СЛАВІКА засвідчую:

Учений секретар Харківського національного
університету радіоелектроніки

Ірина ЖАРІКОВА