ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Євстигнеєва Бориса Євгеновича

"Моделювання властивостей неоднорідних матеріалів на основі характеристик їхнього акустичного та електромагнітного розсіювання",

подану на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю

113 – Прикладна математика

Актуальність обраної теми та її зв'язок з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження в області хвильового розсіювання на неоднорідних об'єктах не втрачають своєї актуальності і в наш час, оскільки в багатьох галузях антенної техніки, телекомунікацій і зв'язку виникає низка нових задач, пов'язаних як із застосуванням високочастотних діапазонів електромагнітних хвиль, так і з появою нових об'єктів розсіювання мікро- і нанорозмірів, практичне застосування яких вимагає строгих розв'язків відповідних електродинамічних задач. Особлива увага при цьому приділяються побудові і вдосконаленню математичних моделей процесів розсіювання, які б найбільш адекватно описували фізичні процеси взаємодії електромагнітних полів із структурами об'єктів розсіювання. Аналіз літературних джерел і останніх досліджень у галузі акустичного та електромагнітного розсіювання показує, що стан розвитку побудови математичних моделей взаємодії акустичних і магнітних полів із структурами неоднорідних матеріалів і методів розв'язування відповідних обернених нелінійних задач, які виникають при цьому, свідчить про незавершеність досліджень у цій галузі.

Тому **актуальними** на даний час залишаються:

- побудова математичних моделей взаємодії неоднорідних структур і фізичних полів, які описуються хвильовими рівняннями та рівняннями Максвелла, а сформульовані на їхній основі задачі оптимізації містять параметри, які визначаються в процесі формулювання та розв'язування обернених задач;

- розробка нових та модифікація існуючих аналітично-числових і числових методів розв'язання задач розсіювання на сукупності включень малого розміру та моделювання на цій основі матеріалів з новими властивостями.

Дослідження за темою дисертації виконувалися в рамках чотирьох науково-дослідних тем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України:

"Розвиток числових методів для нелінійних інтегральних рівнянь типу Гаммерштейна, багатопараметричних спектральних задач і одновимірних та багатовимірних крайових задач математичної фізики" (2019-2023 рр., № держ. реєстрації 0119U100607);

"Моделювання та розвиток методів розрахунку раціонального функціонування

конструкційних елементів і систем різного цільового призначення за комплексних навантажень" (2019-2023 рр., № держ. реєстрації 0123U100908);

"Математичні моделі та аналітично-числові методи дослідження хвильових і нерівноважних процесів різної фізичної природи у неоднорідних середовищах" (2024-2028 рр., № держ. реєстрації 0124U000739);

"Математичне моделювання та ідентифікація захисних поверхневих і структурних властивостей матеріалів щодо механічних, теплових, акустичних та електромагнітних впливів" (2025-2026 рр., № держ. Реєстрації 0125U000322).

Оцінка змісту та завершеності дисертації.

Дисертація є завершеною науковою роботою, в якій побудовано адекватні математичні моделі акустичного та електромагнітного розсіювання на імпедансних тілах малого розміру, на основі яких розроблено числові методи моделювання матеріалів з бажаними коефіцієнтом рефракції та магнітною проникністю. Загальний обсяг роботи – 185 сторінок, основний текст займає – 167 сторінок; вона складається з анотації, вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 117 найменувань і додатків.

У **вступі** висвітлено актуальність тематики досліджень, обґрунтовано вибір теми дослідження; сформульовано мету, об'єкт, предмет і завдання дисертаційної роботи; відображено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів; вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, науково-дослідними темами Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України. Також відзначено внесок здобувача, відомості про апробацію результатів досліджень та подано структуру і обсяг роботи.

У **першому розділі** проведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи, висвітлено основні завдання, які вимагають подальшого розв'язання при дослідженні розсіювання на об'єктах малого розміру, викладено та обговорено фізичні концепції та теоретичні основи розсіювання акустичного та електромагнітного полів в неоднорідних середовищах. Наведено базові формули, які використовується при постановці і розв'язанні задач розсіювання.

Окреслено проблеми використання числових методів при розв'язанні задач розсіювання та розглянуто оптимізаційні задачі, розв'язки яких використовуються для моделювання матеріалів з бажаними властивостями.

Другий розділ присвячено узагальненню асимптотичного підходу до розв'язання задач розсіювання на неоднорідних об'єктах з сукупністю включень довільної форми для їх нерегулярного і випадкового розміщення. Основну увагу зосереджено на побудові редукованих моделей, які дозволяють перейти від опису характеристик окремих розсіювачів до ефективного опису неоднорідного середовища. Подано загальну ідею асимптотичного підходу, спільну для акустичних та електромагнітних хвиль.

Деталізовано моделі для обох випадків розсіювання, на основі яких виведено

формули для ефективних параметрів матеріалів, і на основі проведених числових розрахунків встановлено умови застосовності та обмеження асимптотичного підходу.

Третій розділ присвячено використанню потенціалів Дебая та узагальнених сфероїдальних функцій для постановки і розв'язання задачі електромагнітного розсіювання з метою перевірки адекватності запропонованого асимптотичного підходу.

Проведено порівняння числових результатів, отриманими асимптотичним підходом, що дозволить встановити межі його застосовності до розв'язання задач розсіювання.

У четвертому розділі проведено низку обчислювальних експериментів, які дозволяють встановити можливість моделювати матеріали, які мають від'ємний коефіцієнт рефракції та відмінну від початкового матеріалу магнітну проникність.

Основну увагу приділено верифікації асимптотичного розв'язку шляхом порівняння з еталонними або колокаційними розв'язками; дослідженню збіжності ітераційних процедур; аналізу чутливості характеристик розсіювання до зміни розміру включень, відстані між ними; частоти падаючого випромінювання та матеріальних параметрів. Проведено аналіз нових фізичних характеристик неоднорідних матеріалів.

П'ятий розділ присвячено постановці оптимізаційних задач, на основі яких отримано значення фізичних параметрів неоднорідного матеріалу зі значеннями, близькими до заданих. На основі варіаційної постановки задачі було розроблено генетичний алгоритми розв'язання оптимізаційної задачі.

На відміну від класичної оберненої задачі розсіювання, де за даними про розсіяне поле відновлюють невідомий об'єкт або параметри середовища, в даному розділі розглядається задача іншого типу — задача *оберненого синтезу* матеріалу. її мета полягає не у відновленні вже існуючої структури, а у побудові такої допустимої мікроструктури, яка забезпечує наперед задані ефективні фізичні характеристики.

Отримано числові результати і проведено порівняння з розв'язками прямих задач, отриманих у попередніх розділах. Сформульовано низку рекомендацій для технологічної процедури формування матеріалів з заданими значеннями магнітної проникності.

Висновки присвячено висвітленню основних наукових і практичних результатів, отриманих у результаті проведення дисертаційної роботи.

Результати, отримані під час виконання дисертаційних досліджень, повністю відповідають темі дисертаційної роботи. Усі поставленні в роботі завдання виконані в повному обсязі. Зміст дисертації відображає суть розв'язаного наукового завдання.

Повнота викладу результатів дисертації в публікаціях.

Основні результати досліджень, отримані в дисертації, опубліковано в 14-ох наукових працях, зокрема в 4-ох статтях у наукових фахових виданнях (дві з них перекладено і опубліковано у журналах квартилів Q3 і Q4), 5-ох матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій, які цитуються в міжнародних наукометричних базах

Web of Science та Scopus, та 4-ох тезах міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Основні наукові результати та їх наукова новизна.

У роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання дослідження характеристик розсіювання акустичних і електромагнітних полів на сукупності включень малого розміру з метою моделювання матеріалів із бажаними чи близькими до бажаних коефіцієнтом рефракції та магнітною проникністю.

1. Уперше на основі асимптотичних розв'язків отримано явні аналітичні формули для фізичних характеристик неоднорідних матеріалів з нерегулярними та хаотично розміщеними включеннями малого розміру, на поверхні яких задано імпедансні граничні умови.

2. Встановлено, що допоміжні системи лінійних алгебраїчних рівнянь, які виникають у межах розвинутого підходу, ефективно розв'язуються ітераційним методом, який забезпечує збіжність. Досліджено залежність збіжності від геометричних параметрів мікроструктури та встановлено режими, в яких чисельна реалізація залишається стійкою.

3. Побудовано асимптотичне представлення розсіяного поля для одного імпедансного включення та показано, що воно є спеціальним випадком загальної задачі для багатьох включень за відсутності взаємодії між ними. Описано незалежний напіваналітичний розв'язок на основі потенціалів Дебая, який використовується як числовий еталон для перевірки меж застосовності асимптотичного підходу.

4. Розроблено та досліджено метод оберненого синтезу матеріалів з випадковою мікроструктурою на основі поєднання асимптотичного розв'язку прямої задачі розсіювання на багатьох включеннях малого розміру з оптимізацією на основі генетичного алгоритму. На відміну від класичних задач inverse scattering, розглянута постановка належить до класу задач inverse design, коли розглядається задача побудови допустимої мікроструктури з наперед заданими ефективними характеристиками, що дозволяє ефективно моделювати особливі характеристики матеріальних параметрів.

Наукова обґрунтованість і достовірність отриманих результатів.

Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення, висновки і рекомендації є достатньо обґрунтованими. Їхня достовірність забезпечується фізичною обґрунтованістю постановок прямих задач акустичного та електромагнітного розсіювання, використанням збіжних методів послідовних наближень розв'язання допоміжних задач, узгодженістю асимптотичних розв'язків з тими, які отримано еталонними розв'язком методу потенціалів Дебая, виконанням низки комп'ютерних експериментів і перевіркою практичної збіжності отримуваних розв'язків задач.

Практичне та теоретичне значення отриманих результатів.

1. На основі математичних моделей задач розсіювання розроблено методи і

алгоритми для розв'язання задач розсіювання акустичних та електромагнітних хвиль на сукупності включень малого розміру.

2. Розроблено ефективний метод розміщення включень в однорідному матеріалі, який враховує обмеження на співвідношення геометричних розмірів включень та відстані між ними для випадку нерегулярного та хаотичного розміщення включень.

3. На основі розроблених алгоритмів реалізовано програмне забезпечення із застосуванням генетичного алгоритму оберненого синтезу для розрахунку коефіцієнта рефракції та магнітної проникності неоднорідних матеріалів.

4. Отримані результати числового моделювання можуть слугувати для розроблення рекомендацій щодо формування матеріалів з наперед заданими коефіцієнтом рефракції та магнітною проникністю. Встановлено, що розроблений підхід дає можливість моделювати матеріали з від'ємним коефіцієнтом рефракції, що може бути використано у інженерних застосуваннях формування матеріалів, які мають мінімальні параметри зворотного розсіювання.

Відсутність (наявність) порушень академічної доброчесності.

В опублікованих працях здобувача основні результати дисертаційної роботи представлені з достатньою повнотою. Кількість, обсяг і якісний рівень публікацій відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України, в них не виявлено академічного плагіату, текстових чи ідейних запозичень, а також недостовірної чи сфальсифікованої інформації. Ознак порушення академічної доброчесності не встановлено.

Зауваження до викладеного у дисертації.

1. При обговоренні формул (1.65), (1.66), (2.14), (2.15) йдеться про малість розміру частинки a, але така малість має бути розглянута відносно добутку з хвильовим числом, про це йде мова відносно області D. В цих виразах введено допоміжний параметр ν, який встановлює дробове значення лінійної відстані, однак мета використання даного параметра і переваги, які він може надати при розв'язанні задач, не обговорюються. Всі ці питання слід було викласти більш прозоро.
2. У формулах (2.23), (4.2) використовується матричний оператор A, конкретний вигляд якого ніде не наведено, лише надано опис позначень в таблиці на початку дисертації.
3. Рисунки 2.2 – 2.4, 2.7 варто було б надати з більшою роздільною здатністю та збільшити розмір шрифту в позначеннях осей координат, величини a і d подано в міліметрах, а не відносних одиницях з врахуванням довжини хвилі.
4. Автор доволі вільно поводиться з фізичними термінами і фізичними результатами: наприклад, на стор. 53 автор пише «електричне поле **E** і магнітне поле **H**», хоча має бути напруженість електричного і магнітного полів; при обговоренні таблиці 1.1 стверджується про частотну незалежність діелектричної проникності в НВЧ діапазоні, але наведено воду, яка має суттєву частотну дисперсію на частотах, які вищі за 10 ГГц;

невдалим є позначення ε_0 та μ_0 для діелектричної проникності фонового середовища, оскільки це є загальновживаним для електричної і магнітної констант (в такому сенсі вони використовуються в параграфі 1.2), вони не є проникностями вакууму.

Вказані зауваження та неточності в цілому не впливають на загальну позитивну оцінку наукових результатів з питань прикладної математики, отриманих у дисертаційній роботі.

Загальний висновок.

Представлена робота є завершеним науковим дослідженням у якому на основі асимптотичних розв'язків задач акустичного та електромагнітного розсіювання на сукупності включень малого розміру з імпедансними граничними умовами, встановлено межі застосування розробленого асимптотичного підходу, одержано явні формули для ефективних фізичних параметрів неоднорідних матеріалів, зокрема коефіцієнта рефракції та магнітної проникності, розроблено ефективний генетичний алгоритм оберненого синтезу таких матеріальних параметрів .

Дисертація відповідає спеціальності 113 – Прикладна математика.

Підсумовуючи все вище сказане, можна стверджувати, що дисертація за обсягом виконаних досліджень, новизною, науковою значимістю отриманих результатів та їх рівнем повністю відповідає вимогам Наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44), а її автор, Євстигнеєв Борис Євгенович, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика, з галузі знань 11 – Математика та статистика.

Офіційний опонент:
професор кафедри прикладної радіофізики,
електроніки та наноматеріалів Дніпровського
національного університету імені Олеся Гончара
д.ф.-м.н., професор Олег ДРОБАХІН

Підпис д.ф.-м.н., професора О.О.Дробахіна засвідчую.

Учений секретар Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
к.ф.-м.н., доцент Тетяна ХОДАНЕН

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара * 02066747 *