РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **Євстигнеєва Бориса Євгеновича**

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

поданої до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика

Актуальність теми дисертації та зв'язок з науково-технічними програмами.

Дослідження процесів розсіювання хвиль різної фізичної природи на скупченнях об’єктів складної геометрії є надзвичайно важливим напрямом сучасної прикладної математики, радіофізики та матеріалознавства. Особливу гостроту ця проблема набуває у контексті моделювання та створення штучних матеріалів із заданими аномальними властивостями — метаматеріалів (зокрема з керованими коефіцієнтами рефракції та магнітної проникності), які не мають аналогів у природі. Однак, незважаючи на велику кількість наукових публікацій за даною темою та багатьох інженерних і технологічних реалізацій, не вироблено єдиного підходу до побудови аналітичних або числових розв’язків відповідних задач розсіяння хвиль та не сформульовано загальних принципів моделювання та виготовлення таких матеріалів. З огляду на це, надзвичайно важливими є розроблення математичних моделей розсіювання акустичних та електромагнітних хвиль на сукупності включень (частинок) малого розміру, отримання аналітично-числових розв’язків задач розсіювання та розробка числових методів, спрямованих на розв’язання оптимізаційних задач формування нових матеріалів з особливими фізичними властивостями; зокрема їхнім коефіцієнтом рефракції чи магнітною проникністю.

Дисертаційна робота здобувача спрямована на вирішення актуального науково-прикладного завдання – дослідження характеристик розсіювання акустичних і електромагнітних полів на сукупності включень малого розміру з подальшим використанням розв’язків задач розсіювання для моделювання матеріалів із бажаними чи близькими до бажаних фізичними параметрами, зокрема коефіцієнтом рефракції чи магнітною проникністю, на основі розробленого генетичного алгоритму.

За своїм науковим спрямуванням робота відповідає Планам наукових досліджень Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України та виконувалася в рамках таких науково-дослідних робіт:

“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).

Новизна представлених результатів проведених здобувачем досліджень полягає в розробленні математичної моделі розсіювання акустичних та електромагнітних хвиль на сукупності нерегулярно розміщених тіл малого розміру на основі асимптотичного підходу.

Особливу увагу слід звернути на такі наукові здобутки:

- розроблено алгоритм нерегулярного розміщення включень в однорідному матеріалі, який враховує обмеження асимптотичного підходу, забезпечуючи коректне розв’язання задач розсіювання для сукупності різних геометричних параметрів;
- чисельно встановлено умови збіжності допоміжних систем лінійних алгебраїчних рівнянь, необхідних для аналітичного подання розв’язку задач розсіювання;
- проведено верифікацію результатів асимптотичного підходу на основі порівняння з методом потенціалів Дебая, який використовується як еталонний. Встановлено, що відхилення асимптотичних розв’язків від еталонних не перевищує 2% для широкого набору фізичних параметрів задачі, для яких проводилося порівняння;
- отримано явне подання фізичних параметрів неоднорідних матеріалів, а саме коефіцієнта рефракції для випадку акустичного розсіювання та магнітної проникності для випадку електромагнітного розсіювання, що є основою для ефективного розв’язання оптимізаційних задач, спрямованих на отримання заданих чи близьких до заданих значень цих параметрів;
- розроблено ефективний генетичний алгоритм формування матеріалів з близькими до заданих коефіцієнта рефракції і магнітної проникності.

Наукова обґрунтованість і відповідність темі дисертації отриманих результатів та їх достовірність. Сформульовані у дисертаційній роботі наукові положення, висновки і рекомендації є достатньо обґрунтованими. Їхня достовірність забезпечується коректністю основних наукових засад, фізичною обґрунтованістю вихідних положень математичної моделі хвильового розсіювання на сукупності включень малого розміру, строгістю постановки сформульованих задач та методів їх розв’язування, доброю узгодженістю розв’язків окремих задач з відомими в літературі розв’язками інших авторів, виконанням комп’ютерних експериментів. Результати,

отримані під час виконання дисертаційних досліджень, повністю відповідають темі дисертаційної роботи.

Практичне та теоретичне значення отриманих результатів полягає у розробці моделей акустичного та електромагнітного розсіювання на сукупності включень малого розміру, на поверхні яких задано імпедансні граничні умови. Ефективність та коректність розробленого асимптотичного підходу встановлено на основі порівняння з результатами, отриманими методом потенціалів Дебая.

Алгоритми та програмні засоби, запропоновані у роботі, можуть стати основою для пакету автоматичного проектування матеріалів з наперед заданим коефіцієнтом рефракції чи магнітною проникністю, який може бути доповнений і засобами моделювання інших фізичних властивостей матеріалів, оскільки дія оператора прямої задачі описується заданням векторів відповідних значень.

Розроблене програмне забезпечення надає можливість адекватного моделювання фізичних властивостей неоднорідних матеріалів з структурою, де в однорідну матрицю поміщається сукупність нерегулярно розміщених включень. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості моделювати матеріалів, властивості яких є близькими до властивостей хіральних матеріалів, що підтверджується можливістю отримання від'ємних значень коефіцієнта рефракції.

Рівень виконання поставленого завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності. Зміст дисертації відображає суть розв'язаного наукового завдання. Мова дисертації зрозуміла, дисертант вільно володіє науковою і технічною термінологією в області дифракції акустичних і електромагнітних хвиль. Терміни та визначення, які використовує автор, відповідають прийнятим у чинних нормативних та нормативно-технічних документах. Стиль роботи доступний і уможливлює легке сприйняття матеріалу. Усі поставленні в роботі завдання виконані у повному обсязі.

Аналіз змісту дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, додатку та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 185 сторінок, до яких входить список використаних джерел зі 117 позицій.

У вступі наведено обґрунтування вибору теми дослідження; сформульовано мету, об'єкт, предмет і завдання дисертаційної роботи; відображено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів; висвітлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Також відзначено внесок здобувача, відомості про апробацію результатів досліджень, наведено список публікацій здобувача, подано структуру і обсяг роботи.

У першому розділі проведено огляд літератури за темою дисертаційного

дослідження, окреслено основні проблеми, які вимагають подальшого розв'язання при дослідженні розсіювання на об'єктах малого розміру, викладено та обговорено фізичні концепції та теоретичні основи розсіювання акустичного та ЕМ полів в неоднорідних середовищах. Наведено базові формули, які використовується при постановці і розв'язанні задач розсіювання.

У другому розділі узагальнено асимптотичний підхід 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 ЕМ хвиль. Отримано низку числових результатів, які демонструють ефективність отриманого 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. Встановлено, що результати асимптотичного підходу не відрізняються від результатів методу потенціалів Дебая, який вважається еталонним, не більше, ніж на 2% для обраного обсягу вхідних даних задач розсіювання.

У четвертому розділі проведено низку обчислювальних експериментів, які дозволять встановити можливість моделювати матеріали, які володіють від'ємним коефіцієнтом рефракції та відмінною від початкового матеріалу магнітною проникністю.

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

Проміжні результати дослідження викладено у висновках до розділів, а фінальні здобутки роботи сформульовано в загальних висновках дисертації.

Повнота викладу результатів в опублікованих працях. Результати дисертаційної роботи належною мірою повноти відображені у публікаціях, обговорені на всеукраїнських та міжнародних конференціях, семінарах. За темою дисертації опубліковано 4 наукові праці у фахових наукових журналах, одному розділі закордонної колективної монографії та п'ятьох матеріалах міжнародних наукових конференцій, проіндексованих міжнародними наукометричними базами Web of Science та Scopus.

У цілому, кількість публікацій здобувача відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України. Дослідження за темою дисертації виконано автором в межах планів наукових досліджень ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, теоретичних, прикладних і експериментальних досліджень розрахованих на чотирирічну програму

підготовки аспірантів ступеня доктора філософії з галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

Відсутність (наявність) порушень академічної доброчесності. В опублікованих працях здобувача основні результати дисертаційної роботи представлені з достатньою повнотою. Кількість, обсяг та 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.

Ознайомлення з дисертаційною роботою дає підстави для таких **зауважень**:

1. У огляді літературних джерел недостатньо висвітлено інші підходи та методи розв'язання задач розсіювання акустичних і електромагнітних хвиль у неоднорідних середовищах.
2. Кількість включень є безрозмірною величиною, тому праву частину формули (2.29) необхідно віднести до відстані між площинами розташування центрів розсіювачів у випадку їх хаотичного шарованого розподілу.
3. Рисунки 2.2, 2.5, 2.6, 2.7 ілюструють залежність похибки від розмірних геометричних величин, однак не зазначено, за яких значень частоти отримано числові результати. Така інформація важлива для аналізу меж придатності асимптотичного методу, адже характерні геометричні параметри є маленькими чи великими тільки порівняно з довжиною хвиль, що поширюються у середовищі.
4. На ст. 105 подано помилкове твердження, що гіпотеза Релея полягає у прямуванні розсіяного поля до нуля у дальній зоні.
5. У третьому розділі, який присвячено верифікації розробленого асимптотичного методу, результати наведено тільки для сферичного тіла, хоча говориться і про тіла у формі сфероїда.
6. Текст дисертації містить деякі неоднозначні терміни, як-от «асимптотичний розв'язувач» чи «квадратична складність».

Наведені зауваження не ставлять під сумнів обґрунтованість і вірогідність положень і висновків дисертації та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Загальні висновки. Дисертаційна робота Євстигнеєва Бориса Євгеновича "Моделювання властивостей неоднорідних матеріалів на основі характеристик їхнього акустичного та електромагнітного розсіювання" є завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові, науково обґрунтовані результати, що мають теоретичну та практичну цінність в галузі розсіювання акустичних та електромагнітних хвиль і моделювання матеріалів із заданими чи близькими до заданих фізичними властивостями, і достатньо повно опубліковані у фахових виданнях.

За своєю актуальністю, обсягом виконаних досліджень, новизною, обґрунтованістю та науковою і практичною значимістю наукових результатів дисертаційна робота відповідає змісту освітньо-наукової програми спеціальності 113 - Прикладна математика, вимогам до оформлення дисертації, затверджених Міністерством науки та освіти України від 12.01.2017 р. № 40 та пунктам 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 №44 від 12 січня 2022 (зі змінами), а її автор, Євстигнеєв Борис Євгенович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 11 "Математика та статистика" за спеціальністю 113 "Прикладна математика".

Рецензент:
Завідувач відділу обчислювальної механіки
деформівних систем Інституту прикладних
проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України,
доктор фіз.-мат. наук, ст. н. с. Валерій МАТУС

Підпис В.В Матуса засвідчую:

Вчений секретар ІППММ
ім. Я. С. Підстригача НАНУ Оксана КРАВЧИШИН