

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу *Лисечка Віктора Олеговича*
“Дифракція акустичних хвиль на фрагментах конічних поверхонь”,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.06 – акустика

Актуальність теми дисертаційної роботи. Одним із ключових напрямів у сучасній теорії дифракції акустичних хвиль є розроблення та покращення методів розв’язання задач розсіювання на канонічних структурах з краями та вершинами, де градієнти акустичного потенціалу допускають сингулярності. Насамперед, це пов’язано з тим, що розв’язки таких задач необхідні для верифікації наближених методів, які використовують при дослідженні дифракції хвиль на розсіювачах складної геометричної форми. Крім того, вони допомагають глибше зрозуміти та виявити важливі дифракційні механізми, які проявляються у цих розсіювачах. Ці аспекти достатньо переконливо вказують на необхідності розгляду канонічних структур з сингулярностями поверхонь. Серед усієї множини таких структур яскраво вирізняються скінченні конуси. Передусім це тривимірні розсіювачі, які мають широку область технічного застосування. Відомо, що в практичному плані вони застосовуються у гідроакустичних антенах, рупорах, мікрофонах та перетворювачах акустичної енергії. Окремо вони можуть використовуватися для моделювання взаємодії акустичних хвиль із соплами або корпусами літальних апаратів, пошкодженнями і дефектами матеріалів та ін. Разом із тим розв’язання задач дифракції на конічних структурах є складними в математичному плані, бо вимагає коректного врахування сингулярностей поля на краях та вершині. Відтак вивчення задач дифракції на конічних структурах є актуальною задачею, яка з одного боку дозволяє розширити математичний апарат, отримати нові математичні співвідношення, а з іншого виявити на перший погляд неочевидні фізичні ефекти та закономірності.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій. Достовірність та обґрунтованість результатів дисертації впливає з коректної постановки крайових задач, використання строгих та вже апробованих методів їх аналізу, отримання результатів, які допускають фізичну інтерпретацію та співставленні в часткових випадках з даними, отриманими для структур з близькою геометрією незалежними методами.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. у строгій постановці розв’язані задачі дифракції плоскої акустичної хвилі на м’яких та жорстких конусах з круговими краями при довільному куті опромінення та геометричних параметрах розсіювачів;
2. задачі зведено до нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь (НСЛАР) другого роду методом аналітичної регуляризації, що базується на точному аналітичному оберненні сингулярних частин відповідних операторів;
3. отримано НСЛАР другого роду для розв’язання задач дифракції на м’яких та жорстких кругових дисках та апертурах за довільних кутів опромінення; для цих задач запропоновано нові регуляризуючі оператори;
4. вияснено фізичні закономірності формування акустичних полів фрагментами конічних поверхонь у широкому частотному діапазоні, включаючи резонансну область, перехідну та область геометричної акустики; у цих діапазонах встановлено залежності дифракційних характеристик м’яких і жорстких конусів від геометричних параметрів та кутів опромінення;
5. виявлено ефекти: фокусування та запирання акустичних хвиль апертурою зрізаних конусів; низькочастотного резонансного розсіювання жорсткими скінченними конусами та м’якими конусами зі зрізаною вершиною; встановлено залежності основних дифракційних характеристик від кутів зондування скінченних конусів, а також домінуючий вплив поршневої моди на ближнє поле жорстких розсіювачів.

Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих працях. Основні результати достатньо повно викладені дисертантом у 20 наукових працях, серед яких 4 статті надруковані у наукових журналах із переліку видань, затверджених як фахові у галузі фізико-математичних наук, 1 стаття — у журналі, що індексується у міжнародних наукометричних базах.

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, викладені у дисертації, пройшли апробацію на 15-ти наукових міжнародних і вітчизняних конференціях та семінарах.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність. Дисертаційна робота є завершеною кваліфікаційною науковою працею, виконаною особисто здобувачем, яка складається зі вступу, п'ятих розділів, висновків, переліку літератури із 129 найменувань. Робота оформлена у відповідності до вимог, які МОН України висуває до кандидатських дисертацій.

У *вступі* показано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі дослідження, наукову новизну отриманих результатів, а також їх практичне значення.

У *першому розділі* подано огляд наукових праць, у яких наводяться приклади застосування конічних структур в різних областях технічної фізики. Аналізуються наукові праці, де викладено математичні методи вивчення взаємодії акустичних хвиль з конусами.

У *другому розділі* дисертантом розв'язується осесиметрична задача дифракції плоскої акустичної хвилі на скінченному м'якому та жорсткому конусах, тобто розглядається випадок, коли плоска хвиля поширюється вздовж осі симетрії конуса. Природно, що цю задачу дифракції сформульовано в сферичній системі координат як крайову задачу для рівняння Гельмгольца із граничними умовами Діріхле та Неймана відповідно для м'якої та жорсткої поверхонь конуса. Використовуючи метод розділення змінних, розв'язок цих крайових задач автор подає рядами власних функцій у підобластях, утворених конусом. Слід зауважити, що для випадку жорсткого конуса автор враховує збудження поршневої моди, тобто хвилі тиску, незалежної від кутової координати. Знаходження невідомих коефіцієнтів розкладу зводиться до систем суматорних рівнянь, записаних відносно функцій Лежандра з дробовими нижніми індексами. Фізично ці рівняння описують неперервність повного потенціалу та його нормальної похідної на границі підобластей. Індеси функцій Лежандра знаходяться із розв'язку трансцендентних рівнянь і забезпечують виконання граничних умов на бокових поверхнях конуса. Для алгебраїзації отриманих систем суматорних рівнянь автор застосовує метод перерозкладу функцій Лежандра суміжних підобластей. Таким чином вихідна задача дифракції зводиться до НСЛАР відносно невідомих коефіцієнтів розкладу. Головні частини асимптотик матричного оператора цих систем, отримані при великих значеннях індексів, формують оператори типу згортки і автор знаходить для них обернені оператори. Далі, цю пару операторів (оператори типу згортки та обернені) дисертант застосовує для зведення задач дифракції до НСЛАР другого роду, розв'язок яких отримується із наперед заданою точністю і гарантує, що зі зростанням параметра редукції похибка розрахунку прямуватиме до нуля. У дисертаційній роботі такий підхід автор називає методом аналітичної регуляризації. Окремо автор досліджує граничний перехід від задачі дифракції на скінченному конусі до задачі дифракції на диску. У цьому випадку вигляд обернених операторів суттєво спрощується. Дисертантом також отримано наближений аналітичний розв'язок дифракційної задачі в низькочастотного випадку як у випадку конусів так і для диска. У роботі достовірність отриманих результатів встановлюється шляхом перевірки виконання умов спряження акустичних полів на границях виділених підобластей та зіставленням результатів отриманих дисертантом у граничних випадках із відомими.

Автор аналізує закономірності формування дифрагованих полів, що розсіяні м'яким та жорстким конусами скінченної довжини в широкому діапазоні зміни геометричних параметрів і частоти. У цьому плані цікавими є приведені у роботі розподіли полів дифрагованих на конусах великих хвильових розмірів. Значну увагу дисертант спрямовує на дослідження енергетичних характеристик полів, розсіяних скінченними конусами. Ці дослідження дозволили виявити у довгохвильовій області для жорсткого скінченного конуса резонансний характер розсіювання. Важливе місце у роботі відведено вивченню ближнього

поля скінченного конуса. Представлено цікаві розподіли акустичних полів, що формуються вздовж поверхонь м'якого та жорсткого конусів. Ці дослідження дозволили виявити домінуючий вклад поршневої моди при формуванні повного поля в ближній зоні жорстких розсіювачів. Слід відзначити, що дисертантом запропонована методика визначення одного з двох геометричних параметрів конуса при одному відомому за даними одночастотного зондування.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи досліджена задача дифракції плоскої акустичної хвилі на напівнескінченному м'якому та жорсткому конусі зі зрізаною вершиною. Тобто, по суті справи, тут розглядаються задачі доповнюючі, до сформульованих дисертантом у попередньому розділі. Принципова відмінність полягає у тому, що за первинне поле приймається поле плоскої хвилі у напівнескінченній конічній області, яке знаходиться із розв'язку задачі дифракції на напівнескінченному конусі з використанням інтегрального перетворення Конторовича-Лебедева. Відмітимо, що для обох типів поверхонь подання первинного поля у такому вигляді буде різним. Тому тут, дисертантом детально описується зведення задачі до НСЛАР з подальшою її регуляризацією, окремо для м'якої та жорсткої поверхонь. Числовий аналіз автор зосередив на вивченні впливу геометричних параметрів, частоти та характеристик поверхні на розсіювання хвиль напівнескінченим конусом зі зрізаною вершиною у дальній та ближній зонах. Це дозволило вловити ефект фокусування та запирання поля при його виході з м'якої та жорсткої каверни. Вивчення автором енергетичних характеристик розсіювання хвиль сприяло виявленню ефекту низькочастотного резонансного розсіювання м'якою каверною. Заслужовує уваги і дослідження формування ближнього поля в круговій апертурі конічного зонда, яку дисертант розглядає у якості моделі конічного зонда.

Четвертий розділ присвячено вивченню задачі дифракції плоскої акустичної хвилі на скінченному конусі зі зрізаною вершиною. Ця структура у часткових випадках дозволяє моделювати скінченний конус та напівнескінченний конус зі зрізаною вершиною. Тут дисертант теж приводить загальну схему отримання розв'язку задачі. Основна увага приділена дослідженню характеристик дифрагованого поля м'якого конуса у дальній зоні: вони вивчені для різних хвильових параметрів та кутів розхилу конуса.

Важливою на мій погляд є задача дифракції плоскої акустичної хвилі на скінченному конусі при боковому опроміненні, яка розв'язується, в останньому, *п'ятому розділі* дисертаційної роботи. Формулювання такої задачі обумовлене практичними потребами покращення просторової візуалізації дефектів у діагностиці та неруйнівному контролі. В методологічному плані розв'язок цієї задачі будується аналогічно з попередніми розділами, проте для кожного азимутальної гармоніки. Числовий аналіз знову ж таки зосереджено на знаходженні розподілів полів дифрагованого у дальній зоні і як основний результат тут слід відмітити дослідження залежностей просторових діаграм спрямованості та енергетичних характеристик розсіювання від кута опромінення. Автор показав, що максимум у дифрагованому полі формується в напрямку опромінення для обох типів поверхні, а також виявив монотонне спадання повних перерізів розсіювання, коли кут опромінення наближається до напрямку перпендикулярного осі конуса. Окрім того, важливим результатом в інформативному плані, на мою думку, стало виявлення глибоких мінімумів у зворотних позиційних перерізах розсіювання для широких жорстких конусів.

Загалом текст дисертації викладено грамотно в рамках загально прийнятої наукової термінології. Виклад результатів досліджень та висновків подається логічно і послідовно, а дисертаційна робота в цілому являє собою завершену наукову кваліфікаційну працю.

Автореферат написаний зрозумілою науковою мовою, легко читається і адекватно відображає зміст дисертації.

Помічені недоліки та зауваження до роботи:

1. У підрозділі 2.7 та 5.3.1 автором отримано нові регуляризуючі оператори для задачі дифракції на диску, тобто коли кут розхилу конуса вироджується у прямий, $\gamma = \pi/2$. Проте у певних моментах дисертаційної роботи автором не використовуються ці оператори, а натомість аналізується випадок $\gamma = 90.01^\circ$. Напевно у роботі варто було б використовувати ці оператори у повному обсязі.

2. У третьому розділі дисертант отримав подання первинного поля в одній конічній області, що обмежена кутами $\gamma < \theta < \pi$. Напевно, не було б надто складним завданням отримати це подання і у області $0 < \theta < \gamma$.
3. Цікавим було би визначити частотні межі, у яких розв'язки задач дифракції отримані з використанням методу аналітичної регуляризації та без його використання співпадають.
4. Чи може виникнути випадок, коли визначник матричного оператора дифракційної задачі дорівнюватиме нулеві?
5. Не всі твердження обґрунтовані з математичної точки зору достатньо строго, наприклад, в теоремі 2.1 говориться про рівномірну збіжність розвинень, якої не може бути на вказаних проміжках, недостатньо обґрунтоване застосування теорії лишків при обчисленні інтегралів у доведенні теореми 2.1 та у п. 3.2.
6. В тексті дисертації є описки, неузгодженості у позначеннях.

Висновок. Помічені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Виходячи із вище викладеного вважаю, що рецензована дисертаційна робота Лисечка Віктора Олеговича “Дифракція акустичних хвиль на фрагментах конічних поверхонь” є цілісним і завершеним науковим дослідженням. За обсягом та рівнем виконаних досліджень, науковою новизною та ступенем обґрунтованості отриманих результатів, практичних висновків та рекомендацій робота відповідає вимогам щодо кандидатських дисертацій, а за змістом поданого в ній матеріалу спеціальності 01.04.06 – акустика.

Таким чином, дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 11, 13, 14 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 червня 2013 р. № 567 зі змінами та доповненнями, а її автор *ЛИСЕЧКО ВІКТОР ОЛЕГОВИЧ* заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.06 – акустика.

Офіційний опонент,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри математичної фізики
механіко-математичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

А.В. Ловеїкін

А.В. Ловеїкін

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР НДЧ
КАРАУЛЬНА Н.В.
11.10.2018



Лисечко Віктор