Трунов Олександр Олексійович. Назва дисертаційної роботи: "ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ У ВИГНУТИХ ХВИЛЕВОДНИХ СТРУКТУРАХ"

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

На правах рукопису

Трунов Олександр Олексійович

УДК 539.3

ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ У ВИГНУТИХ ХВИЛЕВОДНИХ СТРУКТУРАХ

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник

Маципура Володимир Тимофійович

доктор фізико-математичних наук, професор

Київ–2016

1

ЗМІСТ

Вступ………………………………………………………………………………... 4

Розділ 1. Огляд літератури………………………………………………………11

1.1 Аналіз літературних джерел………………………………………………11

1.2 Вибір напрямку досліджень……………………………………………… 23

Розділ 2. Основні відомості з теорії пружних хвиль в обмежених

та необмежених середовищах………………………………………….24

2.1 Основні рівняння лінійної теорії пружності……………………………24

2.2 Декомпозиція Гріна-Ламе………………………………………………..28

2.3 Вираження напружень і переміщень через пружні

потенціали у декартовій системі координат………………………….30

2.4 Плоскі хвилі у необмеженому пружному середовищі…………...……32

2.4.1 Гармонічні хвилі в необмеженому середовищі………………..35

2.4.2 Поляризація пружних гармонічних хвиль

у необмеженому середовищі……………………….…………….37

2.5 Хвилеводне поширення пружних хвиль………………………………..39

2.6 Поширення SH-хвиль у пружному шарі……………….……………….39

2

Розділ 3. Проходження хвилі крізь згин хвилеводу…………………………..45

3.1 Нормальні хвилі хвилеводу сталої ширини……………………………...45

3.1.1 Метод часткових областей для задачі поширення

нормальної SH-хвилі у нерегулярному хвилеводі………….…..45

3.1.2 Постановка задачі……...…………………………………………..45

3.1.3 Нормальні хвилі криволінійного хвилеводу……………….…….46

3.2 Особливості проходження хвилі крізь згин хвилеводу при

різних варіантах конструктивного оформлення зони згину……………54

3.2.1 Метод часткових областей для хвилеводів з різними вигинами…54

3.2.2 Поля переміщень у часткових областях……………………………56

3.2.3 Побудова розв’язку для хвилеводу сталої ширини……………….58

3.2.4 Енергетичний аналіз……………………………………..………….62

3.2.5 Аналіз чисельних результатів………………………...…………….63

3.3 Поширення імпульсного сигналу крізь

округлений згин хвилеводу……………………………………71

3.3.1 Постановка задачі………………………………………………….71

3.3.2 Поля переміщень………………..…………………………………73

3.3.3 Графічні результати………………………………………………..73

Висновки до розділу 3…………………………………………………………77

Розділ 4. Поширення хвилі у хвилеводі за наявності різкої зміни

ширини в області згину хвилеводу…………………………………..78

4.1 Постановка задачі………………………………………………………….78

4.2 Метод часткових областей для задачі поширення нормальної

SH-хвилі у хвилеводі з різкою зміною ширини вигину………………..79

4.3 Побудова розв’язку………………………………………………………...80

3

4.4 Аналіз чисельних результатів……………………………………………..81

Висновки до розділу 4……………………………………………………………..85

Розділ 5. Поширення хвилі у хвилеводі з подвійним згином у

вигляді перископу……………………………………………………...86

5.1 Постановка задачі………………………………………………………….86

5.2 Побудова розв’зку…………………………………………………………87

5.3 Аналіз чисельних результатів…………………………………………….92

Висновки до розділу 5……………………………………………………………..97

Висновки…………………………………………………………………………...98

Список використаних джерел…………………………………………………100

4

ВСТУП

Актуальність теми

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню процесу поширення

гармонічних хвиль у вигнутих хвилеводах з різними конструктивними

оформленнями зони вигину та дослідженню поширення імпульсного сигналу у

хвилеводі з вигином сталої ширини.

Знання закономірностей хвильових полів у пружних об'єктах є важливим

при конструюванні робочих елементів акустоелектронних, акустооптичних і

гідроакустичних пристроїв. Нерегулярні хвилеводні структури часто

зустрічаються в конструкціях різноманітних пристроїв, тому зацікавленість до

дослідження хвильового поля в них не слабшає [82, 109, 130]. Серед великого

класу нерегулярностей, які мають місце у хвилеводах, можна виділити клас

неоднорідностей, пов’язаних зі зміною геометрії хвилеводу, а саме, наявністю

області вигину у хвилеводі. При цьому параметри середовища, що наповнює

хвилевід, залишаються незмінними. Для ґрунтовного дослідження полів в

нерегулярних хвилеводах доцільно використовувати чисельно-аналітичні

методи.

Якщо відношення характерних розмірів хвилеводу до довжини хвилі являє

собою малу або досить значну величину то, зазвичай, використовують добре

розроблені методи теорії дифракції. Хвилеводи з неоднорідностями, для яких

характерний розмір порівняний з довжиною хвилі досліджені слабше, оскільки

виникають труднощі при побудові строгого розв’язку відповідних граничних

задач. У даній роботі розглядається хвилевід, геометричні розміри якого

порівняні з довжиною хвилі.

У роботі розглядаються як гармонічні у часі хвилеві поля, так і імпульсне

поширення хвилі. Слід відзначити, що в більшості робіт з хвилеводної тематики

досліджується поширення саме гармонічної хвилі. Але в дійсності сигнал має

скінченну в часі тривалість, або іншими словами, представляє собою імпульс.

5

Поширення імпульсу в хвилеводі супроводжується цілою низкою специфічних

ефектів, що викликає значний інтерес до вивчення саме нестаціонарних

процесів. Наукове та практичне значення розгляду нерегулярних хвилеводів і

визначило тему даної дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана у рамках аспірантського плану кафедри

теоретичної та прикладної механіки, затвердженого вченою радою механікоматематичного факультету Київського національного університету імені Тараса

Шевченка, а також бюджетних науково-дослідних тем: “Крайові задачі

динаміки пружних тіл зі спряженими польовими фізико-механічними

властивостями та їх застосування в неруйнівному контролі, сенсорних

мікроелектромеханічних системах та хвильових гіроскопах” (2011–2013 рр.,

держреєстраційний № 0101U002477 : 11БФ038-05), “Математичні та

експериментальні методи механіки спряжених коливальних процесів і

хвильових полів та їх застосування в гіроскопічних геонавігаційних та

мікроелектромеханічних системах” (2014–2015 рр., держреєстраційний №

0114U003474 : 14БП038-02).

Проведені дослідження та отримані результати можуть бути включеними

до курсів ти дисциплін кафедри теоретичної та прикладної механіки механікоматематичного факультету КНУ імені Тараса Шевченка «Динамічні задачі

механіки», «Теорія хвилеводів», «Механіка пружних хвиль».

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка алгоритмів чисельно-аналітичного

дослідження задачі поширення нормальних SH- хвиль у криволінійних

хвилеводах з різними конструктивними оформленнями зони вигину та

визначення закономірностей кінематичних та енергетичних характеристик при

поширенні гармонічної у часі SH-хвилі та імпульсного сигналу. Основним

6

завданням є побудова розв’язку задачі поширення хвиль у хвилеводі, тобто

визначення поля у хвилеводі та проведення енергетичного аналізу.

Для досягнення поставленої мети були розглянуті такі задачі:

– поширення гармонічної SH-хвилі в лінійно-пружному ізотропному

хвилеводі зі згином з різними конструктивними оформленнями зони

вигину:

 сталої ширини,

 з заокругленням,

 зі зрізами,

 у хвилеводі з різкою зміною ширини зони вигину,

 у хвилеводі з подвійним згином;

– визначення дисперсійних співвідношень для хвилеводу сталої ширини;

– дослідження залежності енергетичного коефіцієнта проходження SHхвилею зони нерегулярності хвилеводу.

Об’єктом дослідження є процес поширення стаціонарної та

нестаціонарної хвилі у нерегулярному хвилеводі.

Предметом дослідження є закономірності процесу поширення нормальних

SH-хвиль у пружному хвилеводі з вільними від напружень стінками,

визначення енергетичних характеристик процесу поширення хвиль крізь зону

неоднорідності хвилеводу.

Методом, що використовується в роботі є метод часткових областей. При

застосуванні даного методу вся область існування хвильового поля ділиться на

часткові області. У кожній такій області можна застосувати метод розділення

змінних та записати хвильове поле у вигляді суми частинних розв’язків

рівняння Гельмгольца. Далі необхідно записати умови спряження полів в єдину

область існування хвильового поля. Нескінченна система лінійних алгебраїчних

7

рівнянь другого роду розв’язувалася методом редукції з необхідним контролем

коректності отриманого розв’язку.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Застосовано метод часткових областей для побудови розв'язку задачі

про поширення нормальної SH-хвилі у хвилеводі з вигином для різних

конструктивних оформлень зони вигину.

2. Проведено детальний енергетичний аналіз поширення хвилі крізь зону

неоднорідності хвилеводу.

3. Показано, що заокруглення кутової області зі збереженням ширини

хвилеводу на всій його довжині приводить майже до повної проникності

криволінійної області в широкому діапазоні частот, при цьому структура поля

за вигином суттєво залежить від геометричних параметрів хвилеводу.

4. Побудовано розв'язання задачі про поширення вузькосмугастого

імпульсного сигналу в заокругленому хвилеводі постійної ширини. Показано,

що, підбираючи певним чином геометричні параметри хвилеводу, можна

досягти збереження форми імпульсу на шляху його поширення.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів і висновків

забезпечується використанням добре апробованого математичного апарату та

застосуванням теоретично обґрунтованих числових методів. Достовірність

чисельних результатів забезпечувалась перевіркою точності виконання умов

спряження полів на границях поділу областей зони вигину, а також перевіркою

точності виконання закону збереження енергії при поширенні хвилі вздовж

хвилеводу. В дисертаційній роботі, в окремих випадках, перевірялась збіжність

отриманих результатів з відомими.

Практичне значення одержаних результатів

Дисертація має як теоретичне, так і практичне значення. Отримані

результати дозволяють застосовувати побудований чисельно-аналітичний

8

апарат до задач поширення пружних хвиль у хвилеводах з подібною

геометрією. Оскільки криволінійні хвилеводи знаходять широке застосування в

різноманітних пристроях, робота має практичне застосування.

Особистий внесок здобувача

Дисертація є самостійною науковою працею, в якій висвітлені розробки

автора, що дозволили вирішити поставлені завдання. Робота містить теоретичні

та методичні положення і висновки, сформульовані дисертантом особисто.

Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають

відповідні посилання і використані лише для підкріплення ідей здобувача.

Науковому керівнику належить постановка задачі та загальне керівництво

роботою.

Апробація результатів дисертації

Основний зміст дисертаційної роботи було представлено на таких

наукових конференціях:

- ІІ Міжнародна наукова конференція "Сучасні проблеми механіки"

присвячена 150-річчю кафедри теоретичної та прикладної механіки КНУ ім. Т.

Шевченка, м. Київ, Україна, 28 – 30 серпня 2013 р., Поширення хвиль в

криволінійному хвилеводі.

- Акустичний симпозіум "Консонанс", НАН України, Інститут

гідромеханіки, м. Київ, Україна, 1 – 2 жовтня 2013 р., Нормальні хвилі

криволінійного хвилеводу.

- Міжнародна математична конференція "Диференціальні рівняння,

обчислювальна математика, теорія функцій та математичні методи механіки"

до 100-річчю від дня народження члена-кореспондента НАН України Положого

Георгія Миколайовича, м. Київ, Україна, 23 – 24 квітня 2014 р., Хвильовий

процес у криволінійному хвилеводі з різкою зміною ширини хвилеводу.

9

Дисертація в цілому доповідалась та отримала позитивну оцінку на

науковому семінарі кафедри теоретичної та прикладної механіки Київського

національного університету імені Тараса Шевченка (керівник професор Я. О.

Жук, травень 2015), на об’єднаному науковому семінарі кафедр теоретичної та

прикладної механіки і механіки суцільних середовищ Київського національного

університету імені Тараса Шевченка (керівник професор Я. О. Жук, жовтень

2015), на науковому семінарі відділу гідродинамічної акустики Інституту

гідромеханіки НАН України (керівник академік НАН України В. Т. Грінченко,

листопад 2015).

Публікації

Поставлені цілі досягнуто на основі узагальнення і розробки даних, що

опубліковані у 10 наукових роботах. З них 5 статей [15, 16, 56, 73, 74] у

виданнях, затверджених МОН України; 1 стаття [72] у закордонному виданні.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, розбитих на

підрозділи і пункти, висновків, списку використаних джерел.

У вступі охарактеризовано стан досліджуваної наукової проблеми і

обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, визначено мету й завдання,

об’єкт, предмет, методику дослідження; викладено зв'язок обраного напрямку

дослідження з науковими програмами; висвітлено наукову новизну, практичне

значення отриманих результатів, представлено особистий внесок аспіранта,

апробацію отриманих результатів та публікації за темою дисертації.

У першому розділі міститься огляд літератури за тематикою дисертації та

висвітлено сучасний стан проблеми вивчення питання хвилеводного

поширення пружних хвиль. Показано, що дослідження, визначені метою і

задачами даної роботи, базуються на сучасній теоретичній базі наукових

публікацій.

Другий розділ являє собою стислий довідник понять і характеристик щодо

явища поширення SH-хвиль у пружному шарі.

10

Третій розділ присвячений отриманню чисельно-аналітичного розв’язку

задачі поширення нормальних SH-хвиль у нерегулярних хвилеводах з різними

конструктивними оформленнями зони вигину. Досліджено нормальні хвилі

криволінійного хвилеводу постійної ширини у хвилеводі з вільними межами.

Розглянуто особливості проходження хвилі крізь згин хвилеводу при різних

варіантах конструктивного оформлення зони вигину та показані закономірності

поширення імпульсного сигналу крізь округлений згин хвилеводу постійної

ширини.

У четвертому розділі розглянуто задачу про поширення пружної хвилі у

хвилеводі з різкою зміною ширини зони вигину

У п’ятому розділі розглянуто задачу про поширення пружної хвилі у двох

типах хвилеводів з подвійною зміною напрямку поширення хвилі. Досліджено

енергетичні коефіцієнти проходження хвилі в залежності від параметрів

хвилеводу.

У висновках наведені основні досягнення, які отримано в роботі.

ВИСНОВКИ

Проведенопорівняльнийаналізмодплоскопаралельногота

криволінійногохвилеводіводнаковоїшириниПоказанощовласніформи

одноріднихмодособливопершихномерівкриволінійногоі

плоскопаралельногохвилеводівможутьсуттєвовідрізнятися

Проведенорозвязаннязадачіпропоширенняхвиліухвилеводізі

згиномзрізнимитипамизаокругленнязонизгинуПоказанощопрималомув

порівнянніздовжиноюхвилірадіусузаокругленнязгинучастотнізалежності

енергетичногокоефіцієнтапроходженняхвилеюзонивигинузграфічною

точністюспівпадаютьзрезультатамивідповіднихрозрахунківдляхвилеводузі

зламомПоказанощозізбільшеннямрадіусузаокругленняаждовеличини

рівноїширинихвилеводукоефіцієнтпроходженнязбільшуєтьсяоднак

нерегулярністьчастотноїхарактеристикизберігаєтьсяТакажтенденціямає

місцеідляхвилеводузізрізами

Показанощозаокругленнякутовоїобластізізбереженнямширини

хвилеводунавсіййогодовжиніприводитьмайжедоповноїпроникності

криволінійноїобластівширокомудіапазонічастотприцьомуструктураполя

завигиномсуттєвозалежитьвідгеометричнихпараметрівхвилеводу

Побудованорозвязаннязадачіпропоширеннявузькосмугастого

імпульсногосигналувзаокругленомухвилеводіпостійноїшириниПоказано

щопідбираючипевнимчиномгеометричніпараметрихвилеводуможна

досягтизбереженняформиімпульсунашляхуйогопоширення

Проведенорозвязанняплоскоїзадачіпоширенняхвиліухвилеводі

якийскладаєтьсяздвохплоскопаралельниххвилеводівзєднанихобластю

вигинузрізкоюзміноюшириниПоказанощоенергетичнийкоефіцієнт

проходженнянульовоюмодоюзонивигинузалежитьвідкутарозкривуобласті

вигинуПоказанощовчастотнійхарактеристицікоефіцієнтупроходження

можливірізкизміниЦеповязанозтимщообластьвигинунапевних

частотахповодитьсебеякобємнийрезонатор

Проведенорозвязанняплоскоїзадачіпропоширенняхвиліухвилеводіз

подвійноюзміноюнапрямкупоширенняхвиліРозглянутодваваріантиобласті

згинузламтазаокругленняПоказанощоенергетичнийкоефіцієнт



проходженнянульовоюмодоюзонизламухвилеводусуттєвозалежитьвід

хвилевихпараметрівхвилеводуВчастотнійхарактеристиціспостерігається

наявністьінтервалівдекоефіцієнтпроходженнязменшуєтьсяпрактичнодо

нуляПоказанощозаокругленнязонизгинуробитьхвилевідпрактично

прозоримнавітьзанаявностізаокругленнятількиззовнішньогобокузгину