

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук,  
на дисертаційну роботу  
**Чайки Олександра Сергійовича**

### «ФОРМУВАННЯ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ У ХВИЛЕВОДІ»

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
з галузі знань **17 Електроніка та телекомунікації**  
за спеціальністю **171 Електроніка**

#### **Актуальність теми дисертації.**

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми формування акустичного поля в інформаційних гідроакустичних каналах, які забезпечують зв'язок абонентів системи "надводний корабель-підводний апарат". При цьому були враховані особливості формування акустичного поля в умовах мілкого моря при збуренні середовища каналу "надводний корабель-підводний апарат" хвильовим пакетом та врахуванням особливостей розподілень скалярних і векторних характеристик.

Відомі роботи з досліджень акустичних випромінюючих та приймаючих пристроїв у гідроакустиці вчених: В. Т. Грінченка, В. Г. Савіна, І. В. Вовка, О. Г. Лейка, А. В. Дерепи, О. В. Коржика, Clarence S. Clay, Herman Medvin, Л. М. Бреховских, К. О. Наугольных, И. Б. Андреевой, Г. М. Свердліна, Е.П. Muir та інших.

Результати цієї роботи дозволяють збільшити рівень розуміння взаємодії звукових хвиль з морською водою та обґрунтувати вибір параметрів для ефективного функціонування підводних комунікаційних систем, систем телеметрії та пошукових гідроакустичних засобів. Розробка перспективних модельних постановок та розв'язки задач формування акустичного поля в інформаційних гідроакустичних каналах, які забезпечують зв'язок абонентів системи "надводний корабель-підводний апарат" визначила *актуальність обраної теми дисертації* Чайки Олександра Сергійовича.

У зв'язку з цим при виконанні досліджень у дисертаційній роботі поставлені *мета і задачі*.

#### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

*Мета роботи* полягає у розвитку існуючих і розробці перспективних модельних постановок та розв'язків задач формування акустичного поля в інформаційних гідроакустичних каналах, які забезпечують зв'язок абонентів занурених і поверхневих систем.

При досягненні мети треба врахувати особливості формування акустичного поля в умовах мілкого моря при збуренні середовища

акустичного каналу хвильовим пакетом та врахуванням особливостей впливу акустичного поля на джерело звуку.

Досягнення заявленої мети потребує розв'язання *наступних задач*:

- виконати постановку задачі випромінювання звуку сферичним джерелом в плоскопаралельному регулярному хвилеводі з акустично м'якими границями;
- вибрати координатні системи і визначити форми і кількість часткових областей;
- скласти системи функціональних рівнянь для опису формування акустичного поля;
- розв'язати задачі та відшукати невідомі коефіцієнти розкладень полів;
- провести розрахунки та експериментально їх підтвердити.

*Об'єктом* досліджень є процес формування акустичного поля в мілкому морі сферичним джерелом звуку.

*Предметом* досліджень є акустичний сигнал сферичного джерела звуку.

Об'єкт і предмет визначені вірно. Але тема дисертації більш зв'язана з об'єктом, а повинна бути більше зв'язана з предметом.

В дисертації отримано такі нові наукові результати:

1. Проведено огляд сучасних наукових досліджень щодо опису процесів формування акустичного поля у хвилеводі різними джерелами звуку з урахуванням багатомодовості джерела та його різноманітних конфігурацій.

2. Сформовано задачі, що передбачали застосування методу часткових областей для визначення розподілень акустичних тисків в вертикальних перетинах хвилеводу.

3. Встановлено границю області ближнього поля випромінювача і визначені епюри, які відповідають класичним підходам.

4. Розвинене існуючі та розроблено перспективні модельні постановки та розв'язки задач формування акустичного поля в інформаційних гідроакустичних каналах, які забезпечують зв'язок абонентів системи "надводний корабель-підводний апарат".

5. Досліджено частотні залежності питомого імпедансу в робочому просторі і характеризувано змінення режиму роботи випромінювача.

6. Напрацьовано розрахункові співвідношення для розвитку математичної моделі мілкого моря і її подальшого дослідження.

7. Проведено розрахунки та узгоджено їх з експериментальними дослідженнями.

8. Розроблено пакет програм в середовищі MATLAB для розвинення задачі, проведення чисельних експериментів та подальшого вдосконалення в області обраної теми.

Методами досліджень є класичні методи математичної фізики, які використовуються для розв'язання задачі формування акустичного поля в регулярному плоско-паралельному хвилеводі. У роботі застосована модель мілкого моря з акустично м'якими границями у формі регулярного хвилеводу



з ускладненим сферичним джерелом звуку, а не точковим, щоб підійти до реальної ситуації. Алгоритм розв'язання задачі випромінювання звуку розроблений на основі методології часткових областей для акустичного поля, рівнянь Гельмгольца та методу Фур'є для кожної області, а також умов спряження на границях. Для оцінки достовірності запропонованого застосування методу часткових областей проведено декілька перевірок. Всі ці перевірки є критеріями достовірності запропонованого методу.

Дисертант променів програмне середовище MATLAB, яке автор використовував для визначення характеристик акустичного поля, таких як амплітуда, частота, фаза, інтенсивність, діаграма направленості та інші. Застосування програмного середовища MATLAB є достатнім для проведення розрахунків у дисертації.

Методи дослідження є сучасними та достовірними.

У цілому, результати, отримані автором, є новими науковими знаннями. Положення наукової новизни відображено в публікаціях, що забезпечують повноту викладення здобувачем основних результатів дисертаційної роботи.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Чайки О.С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 171 «Електроніка» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Електроніка».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Чайки О.С. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Практична значимість роботи полягає в можливості використання результатів:

1. У подальшому розвиванні прикладних аспектів фізики мілких морів;
2. В задачах створення робото технічних телеметричних систем та систем звукопідводного зв'язку, а також в освітленні особливостей формування акустичного поля при створенні нових модельних представлень та експлуатації інформаційних каналів під час проведення різних підводних робіт, таких як пошукові, картографічні та дослідницькі;
3. Для практики підводних комунікаційних систем, систем телеметрії та пошукових гідроакустичних засобів.



## Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота викладена українською мовою. Робота викладена на високому науково-технічному рівні з використанням стандартної термінології, що прийнята у прикладній акустиці.

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи складає 161 сторінок, 80 рисунків, список використаних джерел зі 57 найменувань, 5 додатків.

Зміст дисертаційного дослідження викладений у шости розділах, у яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У вступі до даної дисертаційної роботи відзначається важливість і актуальність предмету дослідження. Проводиться обґрунтування вибору даної теми і вказується на її значущість для наукового та практичного спрямування. Відмічене, що одним із цікавих та корисних напрямків акустики є дослідження формування акустичних полів у мілких морях, що не досліджений повністю. Розвиток цього напрямку має великий потенціал для розуміння динаміки мілких морських ділянок та вирішення проблем, пов'язаних з навколишнім середовищем. В подальшому це, наприклад, може допомогти покращити якість життя людей, які мешкають в місцях, що межують з морськими узбережжями. Зазначається, що дане дослідження має на меті досягнення конкретних цілей і вирішення важливих завдань. Визначено основну мету даної дисертаційної роботи, яка полягає у глибокому аналізі обраної проблеми та розробці нових підходів до її вирішення, розуміння і розв'язання актуальних наукових завдань. Подальше розглядання у вступі доповнено більш детальним описом задач дослідження. Додатково, у вступі надається докладний огляд методів, які будуть використані в ході дослідження, щоб досягти поставлених цілей і вирішити задачі. Це дозволяє отримати загальне уявлення про методологічний підхід, що буде використовуватися в роботі.

В першому розділі подано аналітичний огляд наукової літератури, в обсязі якого показано сучасний стан проблемних областей в акустиці рідини. При цьому наведений огляд літератури з поширення акустичних хвиль у мілких морях, коли звукова хвиля відбивається від дна та поверхні води, що призводить до створення еха. Автор наводить основокласичні наукові роботи і прізвіща їх авторів, дані яких будуть використовуватися в особистих роботах автора у подальшому. методі.

Важливі висновки, що зробив автор в кінці першого розділу. Автор відмічає, що у результаті аналізу сучасного стану проблеми є підстави сподіватися на отримання нових результатів та на подальше просування запропонованих підходів. Відтак слушним буде проведення наукового дослідження, спрямованого на дослідження можливостей використання методу часткових областей для аналізу специфіки формування акустичного поля у складних джерелах в плоскопаралельному регулярному хвилеводі з урахуванням багатомодовості. Автором визначено границі розвитку теоретичних засад у подальшому дослідженні зазначеної теми роботи.



Визначене як методологія для власного дослідження методи часткових областей, уявного джерела та зони Фур'є.

Огляд літератури зроблений достатній для проведення автором самостійних робіт.

В *другому розділі* проведено постановку задачі випромінювання звуку сферичним джерелом в плоско-паралельному регулярному хвилеводі з акустично м'якими границями. Дослідження поширення звуку від сферичного джерела мають практичне значення для розуміння та моделювання реальних акустичних систем. Модель мілкого моря розглядається як плоский регулярний хвилевід з комбінованими границями. Для цього випадку описано математичну модель, наведені вихідні співвідношення. Складені системи функціональних рівнянь для вирішення задачі о формуванні акустичного поля. Додатково сформовано постановку задачі для пояснення формування акустичного поля відбитої сферичної хвилі від акустично м'якої границі. Так як задача вимагає різних методів розв'язання, це призвело до постановки двох паралельних завдань. Перша задача передбачає пошук розподілу амплітуд і фаз акустичних тисків або коливальних швидкостей біля випромінювача з урахуванням особливості формування поля в робочому просторі. Друга задача відноситься до обчислення відбитого сферичного поля джерела звуку, що працює на нульовій моді. Тут головним завданням є знаходження коефіцієнта відбиття для сферичної хвилі. Автор порівнює з іншими дослідженнями та експериментальними даними та перевіряє отримані результати. Це значно зменшує масштаби робіт, що повинен провести автор для вирішення поставленої задачі.

В *третьому розділі* приведено розв'язок та обговорення результатів задачі формування відбитого акустичного поля у хвилеводі з симетричними м'якими границями. Наведено вихідні та розрахункові співвідношення для прямого та відбитого поля акустичного тиску у хвилеводі з симетричними м'якими границями. Описані основні етапи отримання вказаних співвідношень, а також підхід та метод аналізу поля у хвилеводі для випадку, коли джерело звуку є не точковим, а сферичним. Для аналізу відбитого поля застосовано плоский розклад сферичної хвилі. Знайдено співвідношення для відбитого поля, розкладаючи сферичну хвилю на плоскі, коефіцієнт відбиття вздовж вертикальній вісі. У моделі хвилеводу заповнено водою, а обмежено повітрям, тому границі хвилеводу є акустично м'якими. Одержані співвідношення корисні для розширення обчислень поля відбиття на всі чотири квадранти за допомогою методу уявного джерела. Для розрахунку відбитого поля у довільній точці першого квадранту приведені співвідношення, що залучають напрацювання щодо створених на межі хвилеводу зон Френеля. Було б доцільно в цьому місці автору довести, що він використовує закони та співвідношення класичної оптики. Та дати посилання на відому літературу. Автору доцільно було б привести графіки зміни амплітуд процесу від хвильового параметру  $kr$ . Розрахунки виконані для різних глибин хвилеводу та робочих частот.



У четвертому розділі приведено розв'язок та обговорення результатів задачі формування відбитого акустичного поля у хвилеводі з симетричними м'якими границями з використанням методу часткових областей. Описані основні етапи отримання математичних співвідношень. Розглянуто симетричну задачу в межах першого квадранту, а також поширено результати на весь хвилевід. Алгоритм розв'язання базується на використанні рівняння Гельмгольца та методу Фур'є для кожної частинної області, з умовами спряження на їх межах. Не використовуються ідеалізовані граничні умови на поверхні джерела, що дозволяє визначити коефіцієнти збудження мод хвилеводу в межах задачі Штурма-Ліувіля. Урахування граничних умов на поверхні та дні моря, а також умови Зоммерфельда покращили точність розподілу поля в вертикальних перетинах хвилеводу. Задача розв'язана в різних системах координат: теоретично більше в сферичних, а для розрахунків – у плоских декартових. Напрацьовано вихідні співвідношення для знаходження та обчислення акустичного імпедансу на поверхні джерела.

Автор базувався на даних відомих з гідроакустики наукових роботах. Треба відмітити, що автор розібрався у складних математичних виразах і зміг використати їх для розв'язання поставлених перед ним задач у окремих визначених рамках. .

П'ятий розділ містить моделювання та обговорення в рамках задачі формування відбитого акустичного поля у хвилеводі з симетричними м'якими границями з використанням методу часткових областей. Проведені аналізи включали вертикальні перетини плоско паралельного регулярного хвилеводу та питомих опорів середовища для комбінаційних хвиль певної моди. Задача мала центральну симетрію, що дозволило провадити розрахунки лише для одного квадранту з подальшим симетричним розповсюдженням на решту квадрантів. Для розрахунків коливальної швидкості була використана методика, що базується на аналітичному розв'язку рівняння коливань в сферичних координатах. Головно базувалась на вже знайдених співвідношеннях для акустичного тиску. Дослідження проводилися для кожного з розглянутих випадків. Результати розрахунків показали, що коливальна швидкість має складну залежність від розмірів випромінювача, питомих опорів середовища, частоти коливань, а також глибини хвилеводу.

Автор привів багато хвильових картин розподілення амплітуд тисків в робочих середовищах, активних і реактивних частин імпедансів для багатьох випадків радіусів сфери та глибини каналу, а також відстані від джерела то точки розрахунку. Треба відмітити, що достовірність розрахунків, що проведені автором, підтверджуються характером кривих активної та реактивної частин імпедансів, що відповідає теоретичним засадам з акустики.

Шостий розділ присвячено зіставленню теоретичних напрацювань з експериментальними дослідженнями. Для оцінки відповідності припущень, введених при побудові математичних моделей та виведенні основних рівнянь задачі, проводилися експериментальні дослідження з вимірювання



характеристики напрямленості (ХН) багатомодових перетворювачів. Розроблені основні сценарії перемикання електродів і видів електродування. Вони визначали модовий склад вихідної напруги на навантаження електродів. Для систем перетворювачів вимірювалися характеристики напрямленості дискретних решіток. Ці решітки створені з багатомодових циліндричних кругових перетворювачів. Експеримент проведений у вимірювальному басейні Державного підприємства «Київський науковий дослідний Інститут Гідроапаратури». В результаті аналізу діаграм встановлено, що характер просторових залежностей амплітуд тисків, які виміряні в робочому просторі, відповідає розрахунковим моделям, різниця не перевищує 3 децибелів. Результати вимірювань визначили межу, з якої відбуватиметься формування поля в хвилеводі. Результати позитивно характеризують обраний підхід до розв'язку поставленої задачі випромінювання.

Ці результати дозволили обумовити практичну цінність дисертаційної роботи.

У висновках автор стисло подає основні результати роботи що підкріплюють наукову новизну та практичні результати роботи.

У цілому, результати, отримані автором, є новими науковими знаннями. Отримані в роботі результати можуть використовуватись у навчальному процесі вищих навчальних закладів України, у тому числі НТУУ «КПІ» імені Ігоря Сікорського при підготовці інженерів-акустиків. А також у Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара на фізико-технічному факультеті при вивченні курсу «Акустика та дослідження вібрацій у машинах» при підготовці інженерів-механиків з спеціальності 131 Прикладна механіка.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Результати роботи були оприлюднені у 12 публікаціях наукових робіт: у тому числі в 5 статтях, які є у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 171 Електроніка, та 3 включені до міжнародних наукометричних баз; 4 тезах доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Статті опубліковано в наукових фахових виданнях України категорії А і Б для спеціальності 171 Електроніка. Така кількість достатня і згідна вимогам щодо експерименту з присудження звання доктор філософії. Результати дисертаційної роботи доповідались на 4 міжнародних конференціях, що свідчить про достатню апробацію дисертаційного дослідження. Рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам ДАК України. Наукові публікації стосуються сфери прикладної акустики і повністю відображають результати



дисертаційного дослідження. Стиль і зміст публікацій відповідає високому рівню, що висуваються до наукових публікацій.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Серед наукових робіт дисертанта є такі, що мають занадто велику кількість співавторів (5-9). Бажано в подальшій роботі мати особисті публікації.

2. Деякі пункти новизни бажано написати більш коректно. Наприклад, пункт 2 наукової новизни краще сформулювати так: «Вперше вирішені задачі, що передбачили застосування методу часткових областей для визначення розподілень акустичних тисків в вертикальних перетинах хвилеводу»; пункт 6 «Вперше здійснено подальший розвиток математичної моделі мілкого моря, напрацьовані розрахункові співвідношення».

3. В анотації та во вступі описана проблема, але не зроблений акцент на актуальність теми.

4. В тексті дисертації часто відсутні пояснення математичних символів. Так, стор. 36, 37 не пояснено, що  $\psi$  – це потенціал. Не пояснені математичні позначення у математичних виразах (2.2), (2.4), (3.4.), (3.5), (4.1), (4.3), (4.4), (4.6), (4.23). На стор. 44 не розшифровано скорочення «кута ССФ». У виразі (4.11) є помилка у чисельнику.

5. В роботі присутні орфографічні помилки та помилки у словах. Наприклад, у номері 5 списку особистих робіт в назві статті не дописано останнє слово. Бажано у дисертації не використовувати слова «було», був» и тим паче. Стор. 42 Фраза «обговорення результатів задачі», потрібно «обговорення результатів з вирішення задачі...». Випадково на стор 79 написано посилання на рис. 12. Але рисунка з таким номером у роботі не має.

6. Є невірні терміни. Стор. 44 у фразі на 4 строчці зверху написано «...і амплітуда згасне за рахунок розходження фронту». В цьому випадку треба писати, що амплітуда зменшиться за рахунок розходження фронту». Бо треба ураховувати гіперболічний закон зменшення амплітуди у полі сферичної хвилі.

7. Стор. 47. Тут описуються закони з лінійної оптики, але посилання на фундаментальну літературу з оптики не зроблене.

8. Висновки до роботи не пронумеровані. Написані у «вільному» стилі. Кожний висновок повинен закінчуватися фразою «...,що дозволяє..».

Вважаю, що наведені зауваження не зменшують наукову цінність роботи, а її практичні результати дозволяють оцінити дисертаційну роботу позитивно.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Чайки Олександра Сергійовича на тему «ФОРМУВАННЯ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ



У ХВИЛЕВОДІ» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі Електроніка. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.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.

Здобувач Чайка Олександр Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 171 Електроніка.

Офіційний опонент,  
професор кафедри механотроніки,  
Дніпровського національного університету  
імені Олеся Гончара,  
доктор технічних наук, професор,  
Відмінник Освіти України



Г. І. Сокол

