

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на умовах рукопису

ПИРОГОВСЬКА ТЕТЯНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 004.65

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ НА ОСНОВІ
ВВЕДЕННЯ ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ**

121 – Інженерія програмного забезпечення

12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Тетяна ПИРОГОВСЬКА

Науковий керівник:
доктор технічних наук, доцент
Мусієнко Андрій Петрович

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Пироговська Т.В. Методи та програмні засоби підвищення ефективності моделювання гідроакустичного сигналу на основі введення вагових коефіцієнтів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Актуальність теми. Аналіз існуючого сучасного програмного забезпечення моделювання гідроакустичних сигналів доводить, що таке моделювання потребує детального дослідження фізичних процесів розповсюдження звуку у водних середовищах для досягнення максимального можливого наближення та точності до реальних показників, що може використовуватись у різноманітних сферах людської діяльності. Основні виклики сучасних методів моделювання та їх програмної реалізації виникають при моделюванні розповсюдження звуку у водних середовищах у проміжках часу та руху джерела звуку та приймача. Таке моделювання вимагає складних та ресурсозатратних розрахунків, що значно ускладнює роботу науковців.

Питанням моделювання морського середовища та розповсюдження звуку має велику кількість досліджень, зокрема це питання досліджували такі науковці як Бріллюен Л., Бреховських Л., Манн Я. А., Тічі Я., Романо А. Дж., Мобаракє П. С., Грінченко В. Т., Попов В. В., Солтанья Б., Зражевський Г. М., Коржик О., Найда С., Курдюк С., Ніжинська В., Коржик М., Найда А., Ляо С., Сяо В., Ван Ю., Ван Л., Цинь Ц., Лі З., Лю Д., Распет Р., Грейвс Р., Нагл А., Убералл Г., Зарур Г., Вествуд Е.К., Тіндл К.Т., Чепмен Н.Р., Боннель Жюльєн, Фламан Жюльєн, Далл'Осто Девід, Ле Біан Ніколя, Даль Пітер та інші.

Дослідження утворення гідроакустичних каналів, розробка підводного зв'язку та телеметрії вимагають більшої деталізації в заданні вхідних параметрів. Постановка хвильового рівняння має передбачати процес поширення акустичних збурень з врахуванням впливу відбитого та розсіяного поля. Одним з способів вирішення даного питання є моделювання звукового поля методом нормальних хвиль. Розробка,

моделювання та використання такого підходу потребує введення часової залежності між змінними динамічної системи. Це дозволить проводити більш глибоке дослідження процесу поширення звукових хвиль в підводному каналі, їх акустичних тиск в вертикальних перетиках середовища та встановлення коефіцієнтів збурення полі під час роботи з джерелом.

Найбільш ефективно застосування методу нормальних мод є для випромінювачів, що генерують звук на низькій частоті. В роботах показано, що шум корабля, що віддаляється, можна віднести до низькочастотного. Під час подібних досліджень звукових хвиль та їх випромінювача, досить часто використовується тиск та акустична енергія, що визначені в кожній точці середовища. Спектри судового шуму та шуму перевезення з використанням методу нормальних хвиль, для оцінки точності методу використовуються дані отримані для профілю Мунка. Дно розглядається як шар з різною швидкістю та щільністю, тож метод можливо застосовувати для більш широкого спектру задач.

В більшості розглянутих задач, перехід до тривимірної моделі методу нормальних хвиль має певну проблематику пов'язану зі стійкістю нелінійних нормальних мод. Тривимірна модель, при застосуванні методу, не враховує в явному вигляді змінну часу. Вважається, що застосування методу нормальних мод можливе при умові, що моди є незмінними протягом певного часового періоду. Проте, при дослідженні випромінювання точкового джерела циліндричного хвилеводу, врахування часової змінної є необхідним.

Моделювання гідроакустичного середовища потребує високої деталізації моделей, що підвищить точність результатів моделювання, а також забезпечить можливість задання специфічних умов експерименту. Проте такий спосіб моделювання потребує врахування багатьох фізичних параметрів, що в свою чергу створює потребу в обробці великих масивів даних, що знижує швидкість обчислень і вимагає більш потужних обчислювальних систем. Інтеграція нових підходів до моделювання гідроакустичного поля дозволить комплексно вирішувати задачі моделювання. Проте нові підходи також мають підвищувати ефективність методу без

втрата точності розрахунків. Зокрема існує необхідність в комбінуванні існуючих методів для забезпечення подальшого розвитку систем визначення морських об'єктів.

Для розв'язання протиріччя, яке було визначене, в дисертаційній роботі розв'язується актуальне наукове завдання *щодо розробки методів та програмного забезпечення моделювання сигналу дальнього поля на основі введення вагових коефіцієнтів в методі нормальних мод для врахування нелінійності моделі морського середовища.*

Дисертаційне дослідження виконане відповідно до планів наукової та науково-технічної діяльності Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці та є частиною досліджень в рамках науково-дослідних робіт: "Методи забезпечення функціональної стійкості розподілених інформаційних систем підприємств". Державний реєстраційний номер: 0121U108334, КПП, 2021-2025 рр. Терміни виконання: початок – 01.03.2021 р. закінчення – 28.02.2025 р; “Дослідження інтелектуальних комп’ютерних моделей та алгоритмів аналізу сигналів морського середовища”, договір № Д/020.01/0204.02/58/2020 від 23 грудня 2020 р. між КПП ім. Ігоря Сікорського та Інститутом Океанографічного Приладобудування Академії наук провінції Шандунь (КНР) про виконання наукової теми; договір № DLN-20-DP-01 від 15 грудня 2020 р. (zareestrovano в КПП ім. Ігоря Сікорського за № д/0201.01/0204.02/55/2020 від 23.12.2020р.) з надання Послуг з розробки програмного забезпечення між КПП ім. Ігоря Сікорського та Товариством з обмеженою відповідальністю «Науково–виробниче підприємство «СИМВОЛ».

Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні ефективності програмних засобів комп’ютерного моделювання сигналу дальнього гідроакустичного поля за рахунок удосконалення класичного методу нормальних мод та розроблення узагальненого методу для моделювання сигналу.

Основні завдання дослідження включають:

1. Дослідити існуючі методи моделювання гідроакустичного поля, з метою вибору методу для подальшого використання при розробленні програмного забезпечення.

2. Проаналізувати існуюче програмне забезпечення моделювання гідроакустичних сигналів та визначити його переваги та недоліки для пошуку способів покращення існуючих методів моделювання.

3. Удосконалити класичний метод нормальних мод для моделювання сигналу дальнього поля на основі введення зміни швидкості звуку з глибиною та часової змінної з метою врахування особливостей розповсюдження звуку у водних середовищах.

4. Удосконалити класичний метод нормальних мод введенням вагових коефіцієнтів з метою врахування нелінійності морського середовища.

5. Розробити узагальнений метод нормальних мод на основі розроблених удосконалень: введення залежності зміни швидкості з глибиною, часової змінної та вагових коефіцієнтів.

6. На основі модельно-орієнтованого підходу розробити архітектуру програмного забезпечення та користувацький інтерфейс моделювання сигналу дальнього поля на основі введення вагових коефіцієнтів з метою врахування нелінійності морського середовища.

7. Розробити програмне забезпечення моделювання гідроакустичних сигналів дальнього поля та провести тестування з метою доведення коректності теоретичних результатів.

Об'єктом досліджень є процес комп'ютерного моделювання гідроакустичних сигналів в дальньому полі.

Предметом досліджень є методи, алгоритми та програмні засоби комп'ютерного моделювання гідроакустичних сигналів в дальньому полі.

Дисертаційні дослідження проводились на основі гідроакустичної теорії. Теоретичні основи фізичних процесів розповсюдження звуку у водному середовищі комбінаторної теорії, аналітичного моделювання та дискретної оптимізації. Методи теорії обробки спостережень для аналізу експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено класичний метод нормальних мод для моделювання гідроакустичного сигналу, який відрізняється від існуючих введенням залежностей

швидкості звуку від глибини для врахування особливостей водного середовища та зміни акустичного тиску з часом.

2. Вперше розроблено узагальнений метод нормальних мод на основі врахування змінної швидкості звуку, часової змінної та введення вагових коефіцієнтів для визначення як лінійних, так і нелінійних випадків, що дозволить підвищити точність обрахунків акустичного тиску в хвилеводі.

3. Вперше розроблено архітектуру програмного забезпечення моделювання гідроакустичних сигналів на основі удосконаленого та узагальненого методів нормальних мод, яка до того ж відрізняється від існуючих можливістю задання різних параметрів середовища моделювання, які збільшує швидкість обрахунків на 30%, та впливають на побудову сценарію руху об'єкта спостереження.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Вперше розроблено програмне забезпечення комплексної системи моделювання гідроакустичних сигналів на основі запропонованих удосконаленого методу. Зокрема в реалізації було запропоновано спосіб спрощення та пришвидшення обрахунків за використанням паралельних обчислень за законом Амдала. Впровадження зазначеного програмного забезпечення дозволяє з більшою точністю та швидкістю отримати результати моделювання розповсюдження звуку у водному середовищі.

2. Проведено аналіз ефективності запропонованих методів моделювання гідроакустичних сигналів. Аналіз показав, що, за результатами моделювання розповсюдження гідроакустичного сигналу в морському середовищі, розроблений узагальнений метод дозволяє зменшити час обрахунку в середньому на 30 % без погіршення точності отриманих результатів. Це надає можливість стверджувати, що ефективність моделювання гідроакустичних сигналів методом нормальних мод підвищується.

Результати досліджень прийняті до впровадження в Конструкторському бюро «Шторм» КПІ ім. Ігоря Сікорського (акт від 26.02.2025 р.), в навчальний процес кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисципліни «Інженерія даних та знань» для студентів освітнього рівня

«Магістр» спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» денної та заочної форми навчання(акт від 26.02.2025 р.).

Реалізація удосконаленого методу нормальних мод на основі вагових коефіцієнтів дозволяє: ефективніше моделювати фізичні процеси, які відбуваються у водному середовищі при поширенні звуку; знизити вимоги до устаткування, потрібного для запуску програмного забезпечення; експериментувати та порівнювати різні моделі поширення звукових хвиль у водному середовищі.

Мета досліджень щодо підвищенні ефективності методів та програмного забезпечення моделювання сигналу дальнього поля на основі введення вагових коефіцієнтів в методі нормальних мод для врахування нелінійності моделі морського середовища досягнута і усі поставлені наукові часткові завдання вирішені повністю. Отримані наукові результати дисертаційних досліджень є внеском в розвиток інформаційних технологій для системного аналізу, дослідження, розроблення архітектури та методів побудови багаторівневих комп'ютерних систем моделювання гідроакустичних явищ, зокрема комерційного призначення.

Перспективними шляхами досліджень є розробка нових і удосконалення існуючих моделей та методів підвищення ефективності моделювання гідроакустичних явищ, зокрема розширення врахованих факторів, які можуть впливати на обрахунок.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення, архітектура програмного забезпечення, розробка програмного забезпечення, інформаційні технології, інформаційна система, аналіз даних, математичне моделювання, гідроакустика, моделювання гідроакустичних сигналів, модельно-орієнтований підхід, база знань, база даних.

ANOTATION

Pirogovska T.V. Methods and software tools for increasing the efficiency of hydroacoustic signal modeling based on the introduction of weighting coefficients. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 121 “Software Engineering”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2024.

Relevance of the topic. Analysis of existing modern software for modeling hydroacoustic signals proves that such modeling requires a detailed study of the physical processes of sound propagation in aquatic environments to achieve the maximum possible approximation and accuracy to real indicators, which can be used in various spheres of human activity. The main challenges of modern modeling methods and their software implementation arise when modeling sound propagation in aquatic environments in time intervals and the movement of the sound source and receiver. Such modeling requires complex and resource-intensive calculations, which significantly complicates the work of scientists.

The issue of modeling the marine environment and sound propagation has been the subject of a large number of studies, in particular, this issue was investigated by such scientists as Brillouin L., Brekhovskiy L., Mann Ya. A., Tichy Ya., Romano A. J., Mobarake P. S., Grichenko V. T., Popov V. V., Soltannya B., Zrazhevsky G. M., Korzhyk O., Naida S., Kurdyuk S., Nizhynska V., Korzhyk M., Naida A., Liao S., Xiao V., Wang Y., Wang L., Qin C., Li Z., Liu D., Raspet R., Graves R., Nagle A., Uberall G., Zaroor G., Westwood E.K., Tindle K.T., Chapman N.R., Bonnell Julien, Flaman Julien, Dall'Osto David, Le Bian Nicolas, Dahl Peter and others.

Studies of the formation of hydroacoustic channels, the development of underwater communication and telemetry require greater detail in specifying the input parameters. The formulation of the wave equation should provide for the process of propagation of acoustic disturbances taking into account the influence of the reflected and scattered fields. One of the ways to solve this issue is to model the sound field using the normal wave method. The

development, modeling and use of such an approach requires the introduction of a time dependence between the variables of the dynamic system. This will allow for a more in-depth study of the process of sound wave propagation in an underwater channel, their acoustic pressure in vertical intersections of the medium and the establishment of field perturbation coefficients when working with the source.

The most effective application of the normal mode method is for emitters that generate sound at low frequencies. The works show that the noise of a moving ship can be attributed to low-frequency. During such studies of sound waves and their emitter, pressure and acoustic energy, which are determined at each point in the medium, are quite often used. Spectra of ship noise and traffic noise using the normal wave method, data obtained for the Munch profile are used to assess the accuracy of the method. The bottom is considered as a layer with different speeds and densities, so the method can be used for a wider range of tasks.

In most of the problems considered, the transition to a three-dimensional model of the normal wave method has certain problems associated with the stability of nonlinear normal modes. The three-dimensional model, when applying the method, does not explicitly take into account the time variable. It is believed that the application of the normal mode method is possible under the condition that the modes are unchanged over a certain time period. However, when studying the radiation of a point source of a cylindrical waveguide, taking into account the time variable is necessary.

Modeling of the hydroacoustic environment requires high detail of the models, which will increase the accuracy of the modeling results, and also provide the possibility of specifying specific experimental conditions. However, this method of modeling requires taking into account many physical parameters, which in turn creates the need to process large data sets, which reduces the speed of calculations and requires more powerful computing systems. Integration of new approaches to modeling of the hydroacoustic field will allow for a comprehensive solution to modeling problems. However, new approaches should also increase the efficiency of the method without losing the accuracy of calculations. In particular, there is a need to combine existing methods to ensure the further development of marine object detection systems.

To resolve the contradiction that was identified, the dissertation solves a relevant scientific problem regarding the development of methods and software for modeling the far-field signal based on the introduction of weighting coefficients in the normal mode method to take into account the nonlinearity of the marine environment model.

The dissertation research was carried out in accordance with the plans of scientific and scientific-technical activities of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" and the Department of Software Engineering in Energy and is part of the research within the framework of scientific and research works: "Optimization of the operation of web-oriented systems with a large set of data" (state registration number 0117U004913, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv), "Methods for managing heterogeneous distributed databases with a dynamic structure based on a network-centric approach" (state registration number 0121U109260, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv), which are carried out by the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" in 2020 - 2024.

The purpose of the dissertation is to increase the efficiency of software tools for computer modeling of the far-field hydroacoustic signal by improving the classical normal mode method and developing a generalized method for signal modeling.

The main objectives of the research include:

1. To investigate existing methods for modeling the hydroacoustic field, in order to select a method for further use in software development.
2. To analyze existing software for modeling hydroacoustic signals and determine its advantages and disadvantages in order to find ways to improve existing modeling methods.
3. To improve the classical normal mode method for modeling the far-field signal based on the introduction of the change in sound speed with depth and a time variable in order to take into account the peculiarities of sound propagation in aquatic environments.
4. To improve the classical normal mode method by introducing weighting factors in order to take into account the nonlinearity of the marine environment.
5. Develop a generalized normal mode method based on the developed improvements: introduction of the dependence of the velocity change with depth, time variable and weighting factors.

6. Based on a model-oriented approach, develop a software architecture and user interface for far-field signal modeling based on the introduction of weighting factors in order to take into account the nonlinearity of the marine environment.

7. Develop software for modeling far-field hydroacoustic signals and conduct testing to prove the correctness of the theoretical results.

The object of research is the process of computer modeling of far-field hydroacoustic signals.

The subject of research is methods, algorithms and software for computer modeling of far-field hydroacoustic signals.

The dissertation research was conducted on the basis of hydroacoustic theory. Theoretical foundations of physical processes of sound propagation in the aquatic environment of combinatorial theory, analytical modeling and discrete optimization. Methods of the theory of observation processing for the analysis of experimental data.

Scientific novelty of the results obtained.

1. The classical normal mode method for modeling hydroacoustic signals has been improved, which differs from existing ones by introducing the dependences of sound speed on depth to take into account the characteristics of the water environment and changes in acoustic pressure over time.

2. For the first time, a generalized normal mode method has been developed based on taking into account the variable sound speed, time variable, and the introduction of weighting factors to determine both linear and nonlinear cases, which will allow to increase the accuracy of calculations of acoustic pressure in the waveguide.

3. For the first time, a software architecture for modeling hydroacoustic signals has been developed based on the improved and generalized normal mode method, which also differs from existing ones by the possibility of specifying various parameters of the modeling environment, which increase the speed of calculations by 30% and affect the construction of the scenario of the movement of the observation object. Practical significance of the obtained results. For the first time, a software for a complex system for modeling hydroacoustic signals was developed based on the proposed improved method. In particular, a method for simplifying and accelerating calculations using parallel calculations

according to Amdahl's law was proposed in the implementation. The implementation of the specified software allows for more accurate and faster results of modeling sound propagation in the aquatic environment.

An analysis of the effectiveness of the proposed methods for modeling hydroacoustic signals was conducted. The analysis showed that, according to the results of modeling hydroacoustic signal propagation in the marine environment, the developed generalized method allows reducing the calculation time by an average of 30% without deteriorating the accuracy of the results obtained. This makes it possible to state that the effectiveness of modeling hydroacoustic signals using the normal mode method increases.

The results of the research have been accepted for implementation in the Scientific and Methodological Center for Personnel Policy of the Ministry of Defense of Ukraine in the Design Bureau "Storm" of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, in the educational process of the Department of Software Engineering in Energy of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" when teaching the discipline "Data and Knowledge Engineering" for students of the "Master" level of education in specialty 121 "Software Engineering" of full-time and part-time study.

The implementation of the improved normal mode method based on weighting coefficients allows: to more effectively model physical processes that occur in the aquatic environment during sound propagation; to reduce the requirements for the equipment required to run the software; to experiment and compare different models of sound wave propagation in the aquatic environment.

The goal of the research to increase the efficiency of methods and software for modeling the far-field signal based on the introduction of weighting coefficients in the normal mode method to take into account the nonlinearity of the marine environment model has been achieved and all the scientific partial tasks have been fully solved. The obtained scientific results of the dissertation research are a contribution to the development of information technologies for system analysis, research, development of architecture and methods for building multi-level computer systems for modeling hydroacoustic phenomena, in particular for commercial purposes.

Promising research paths are the development of new and improvement of existing models and methods for increasing the efficiency of modeling hydroacoustic phenomena, in particular the expansion of the factors taken into account that can affect the calculation.

Keywords: software engineering, software architecture, software development, information technology, information system, data analysis, mathematical modeling, hydroacoustics, modeling of hydroacoustic signals, model-oriented approach, knowledge base, database.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Свинчук О.В., Пуха Г.С., Євтушенко А.М., Пироговська Т.В. Моделювання розповсюдження гідроакустичного сигналу променевим методом. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2022. Т. 24, № 1. С. 36 – 50.

<https://doi.org/10.35681/1560-9189.2022.24.1.262745>

<http://drsp.ipri.kiev.ua/article/view/262745>

2. Пироговська Т., Довженко Т.П. Розробка користувацького інтерфейсу введення криволінійної траєкторії. Науково-практичний журнал «Зв'язок», 2023, № 4 (164). С. 39 – 45.

<https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.049000>

<https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/issue/view/168>

3. Пироговська Т., Євтушенко А. Структура бази знань моделювання гідроакустичних полів на основі променевої теорії. Науково-практичний журнал «Зв'язок», 2023, № 5 (165). С. 57 – 62.

<https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.055665>

<https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/issue/view/169>

4. О.В. Залевська, Г.С. Пуха, І.А. Варава, О.В. Коваль, Т.В. Пироговська, А.П. Мусієнко. Коефіцієнти Чебишева в моделюванні хвильового процесу методом нормальних мод. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2024. Т. 26 № 2. С. 10-18.

<https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.2.316706>

<http://drsp.ipri.kiev.ua/article/view/316706>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Пироговська Т.В., Євтушенко А.М., Аналіз параметрів моделювання гідроакустичного поля променевим методом. Сучасні аспекти інженерії програмного

забезпечення/Modern aspects of Software Engineering: II Міжнар. наук.-практ. конф.: наук. зб., – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023 р, с. 104-108.

6. Пироговська Т.В., Мусієнко А.П., Аналіз алгоритму пошуку траєкторії об'єкту у морському середовищі. III Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку», тези доповіді, 2023, м. Київ, с. 251-253.

7. Пироговська Т.В., Мусієнко А.П., Моделювання сигналу дальнього поля на основі використання коефіцієнтів Чебишева. Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення/Modern aspects of Software Engineering : II Міжнар. наук.-практ. конф.: наук. зб. (Київ, 13 листопада 2024 р.). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024 р., ст.13-15.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ.....	30
1.1. Аналіз існуючих математичних моделей розповсюдження звуку в морі	31
1.1.1. Дослідження обраних математичних моделей розповсюдження звуку в морі	34
1.1.2. Переваги та недоліки описаних методів	45
1.2. Дослідження існуючих систем моделювання гідроакустичних сигналів	49
1.3. Постановка завдання дослідження та часткових завдань дисертації	54
1.4. Висновки до розділу 1	57
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ В МОРІ	59
2.1. Загальні поняття гідроакустики.....	59
2.2. Вплив змінних середовища на розповсюдження гідроакустичних сигналів в морі	66
2.3. Граничні умови при моделюванні гідроакустичних сигналів в морі	69
2.4. Аналіз факторів впливу на поширення гідроакустичної хвилі у середовищі важливих в урахуванні при моделюванні.....	73
2.5. Втрати при поширенні гідроакустичних хвиль	76
2.6. Висновки до розділу 2	82
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ НОРМАЛЬНИХ МОД ТА СТВОРЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРОБКИ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ	84
3.1. Класичний метод нормальних мод. Постановка задачі.	84
3.2. Удосконалення методу нормальних мод на основі введення змінної швидкості звуку.....	86
3.3. Удосконалення методу нормальних мод введенням часової змінної.....	90
3.4. Узагальнений метод нормальних мод на основі введення вагових коефіцієнтів	94
3.5. Статистичне дослідження створеної математичної моделі	96
3.7. Висновки до розділу 3	101
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ МЕТОЛОМ НОРМАЛЬНИХ МОД.....	102

4.1. Використання модельно-орієнтовного підходу в побудові архітектури програмного забезпечення	102
4.2. Побудова онтології предметної області.....	105
4.3. Архітектура програмного комплексу моделювання гідроакустичних сигналів	111
4.4. Демонстрація результатів роботи та оцінка ефективності створеного програмного комплексу.....	129
4.5. Підвищення ефективності програмного забезпечення	135
4.6. Висновки до розділу 4	143
ВИСНОВКИ.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	147
ДОДАТОК А.....	159
ДОДАТОК Б	161
ДОДАТОК В.....	163

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГАС – гідроакустична станція

АС – автоматизована система

ІКС – інформаційно-керуюча система

ІНС – інтелектуальна система

ІС – інформаційна система

ІТ – інформаційна технологія

ПрО – предметна область

ПЗ – програмне забезпечення

ПС – програмна система

ВСТУП

Актуальність теми.

Аналіз існуючого сучасного програмного забезпечення моделювання гідроакустичних сигналів доводить, що таке моделювання потребує детального дослідження фізичних процесів розповсюдження звуку у водних середовищах для досягнення максимального можливого наближення та точності до реальних показників, що може використовуватись у різноманітних сферах людської діяльності. Основні виклики сучасних методів моделювання та їх програмної реалізації виникають при моделюванні розповсюдження звуку у водних середовищах у проміжках часу та руху джерела звуку та приймача. Таке моделювання вимагає складних та ресурсозатратних розрахунків, що значно ускладнює роботу науковців.

Більшість традиційних методів не враховують змінність середовища, таку як температурні градієнти, щільність та солоність води, що змінюються залежно від глибини та географічного положення. Це призводить до значних похибок у прогнозуванні шляхів розповсюдження звукових хвиль.

У більшості класичних моделей не береться до уваги вплив часу на розподіл звукового поля, що знижує точність прогнозування для динамічних умов, де важливий вплив факторів як-от зміни температури та тиску.

Поширення звукових хвиль у водному середовищі, яке має багат шарову структуру (наприклад, з різною щільністю води на різних глибинах), викликає складнощі для традиційних методів, які часто не можуть точно змоделювати взаємодію хвиль із донним шаром і поверхнею.

Класичні методи погано підходять для низькочастотних хвиль, які використовуються в більшості підводних комунікаційних систем. Низькі частоти мають специфічні особливості поширення, які потребують більш складного підходу для точного моделювання.

Багато існуючих методів, зокрема тривимірні моделі, вимагають великих обчислювальних ресурсів для досягнення необхідної точності, що обмежує можливість їх застосування в реальному часі.

Ці проблеми створюють потребу в нових підходах до моделювання, таких як використання нормальних мод та коефіцієнтів Чебишова, що дозволяють враховувати більше параметрів середовища, зокрема його часову динаміку.

Як правило, досліджується розповсюдження не самих звукових хвиль, а динаміка їх параметрів. В зв'язку з чим доцільно встановити дискретну та неперервну залежності між рівнянням нормальних мод сигналу, який генерується імпульсним нерухомим джерелом з плином часу. В роботі розкривається побудова дискретної моделі процесу утворення та поширення звукових хвиль під водою та дослідження даної моделі на адекватність при здійсненні комп'ютерного моделювання за використанням програмного комплексу моделювання гідроакустичних сигналів, а також оцінюється точність апроксимації побудованої моделі.

Крім того, зростання інтересу до розроблення екологічно безпечних технологій стимулює використання гідроакустичних досліджень для моніторингу стану морських екосистем і виявлення впливу антропогенного шуму на морську фауну. У цьому контексті моделювання сигналів сприяє не лише вирішенню прикладних завдань, а й поглибленню наукових знань у галузі підводної акустики.

Таким чином, актуальність досліджень у цій сфері визначається як науковими, так і практичними потребами, спрямованими на розвиток сучасних технологій і збереження природного середовища.

Питанням моделювання морського середовища та розповсюдження звуку має велику кількість досліджень, зокрема це питання досліджували такі науковці як Бріллюен Л., Бреховських Л., Манн Я. А., Тічі Я., Романо А. Дж., Мобараке П. С., Грінченко В. Т., Попов В. В., Солтанья Б., Зражевський Г. М., Коржик О., Найда С., Курдюк С., Ніжинська В., Коржик М., Найда А., Ляо С., Сяо В., Ван Ю., Ван Л., Цинь Ц., Лі З., Лю Д., Распет Р., Грейвс Р., Нагл А., Убералл Г., Зарур Г., Вествуд Е.К., Тіндл К.Т., Чепмен Н.Р., Боннель Жюльєн, Фламан Жюльєн, Далл'Осто Девід, Ле Біан Ніколя, Даль Пітер та інші.

Дослідження утворення гідроакустичних каналів, розроблення підводного зв'язку та телеметрії вимагають більшої деталізації в заданні вхідних параметрів [2]. В роботах [3-4] розглянуто генерацію імпульсів сферичним джерелом біля ідеальної

границі та питання інтерференції взаємодії плоских та сферичних хвиль. Постановка хвильового рівняння має передбачати процес поширення акустичних збурень з врахуванням впливу відбитого та розсіяного поля. Одним з способів вирішення даного питання є моделювання звукового поля методом нормальних хвиль. Розроблення, моделювання та використання такого підходу потребує введення часової залежності між змінними динамічної системи [4]. Це дозволить проводити більш глибоке дослідження процесу поширення звукових хвиль в підводному каналі, їх акустичних тиск в вертикальних перетиках середовища та встановлення коефіцієнтів збурення полі під час роботи з джерелом.

Такий підхід до моделювання потребує аналізу класичних моделей дослідження хвильових процесів. В роботі [5] розглядається двовимірний аналітичний модель хвильового рівняння в циліндричному хвилеводі. Оцінка похибки такого підходу наведена авторами в роботі [6]. Авторами [7] визначається оцінка відстані від випромінювача до початку координат та опис акустичного поля, лише через дискретні структури. В ході роботи [7] розглянутий аналітичний розв'язок для неоднорідного гідроакустичного поля на основі методу нормальних мод. Такий підхід враховує вплив донного прошарку на характеристики поля.

Найбільш ефективно застосування методу нормальних мод є для випромінювачів, що генерують звук на низькій частоті. В роботі [8] показано, що шум корабля, що віддаляється, можна віднести до низькочастотного. Під час подібних досліджень звукових хвиль та їх випромінювача, досить часто використовується тиск та акустична енергія [9], що визначені в кожній точці середовища. В [9] розглядаються спектри судового шуму та шуму перевезення з використанням методу нормальних хвиль. Для оцінки точності методу використовуються дані отримані для профілю Мунка. Дно розглядається як шар з різною швидкістю та щільністю, тож метод можливо застосовувати для більш широкого спектру задач.

В більшості розглянутих задач, перехід до тривимірної моделі методу нормальних хвиль має певну проблематику пов'язану зі стійкістю нелінійних нормальних мод [10]. Тривимірний модель, при застосуванні методу, не враховує в явному вигляді змін часу. Вважається, що застосування методу нормальних мод

можливе при умові, що моди є незмінними протягом певного часового періоду [11]. Проте, при дослідженні випромінювання точкового джерела циліндричного хвилеводу, врахування часової змінної є необхідним.

З описаних робіт вчених можна визначити наступні протиріччя. Моделювання гідроакустичного середовища потребує високої деталізації моделей, що підвищить точність результатів моделювання, а також забезпечить можливість задання специфічних умов експерименту. Проте такий спосіб моделювання потребує врахування багатьох фізичних параметрів, що в свою чергу створює потребу в обробці великих масивів даних, що знижує швидкість обчислень і вимагає більш потужних обчислювальних систем. Інтеграція нових підходів до моделювання гідроакустичного поля дозволить комплексно вирішувати задачі моделювання. Проте нові підходи також мають підвищувати ефективність методу без втрати точності розрахунків. Зокрема існує необхідність в комбінуванні існуючих методів для забезпечення подальшого розвитку систем визначення морських об'єктів.

Для розв'язання протиріччя, яке було визначене, в дисертаційній роботі розв'язується актуальне наукове завдання щодо розробки методів та програмного забезпечення моделювання сигналу дальнього поля на основі введення вагових коефіцієнтів в методи нормальних мод для врахування нелінійності моделі морського середовища.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження виконане відповідно до планів наукової та науково-технічної діяльності Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці та є частиною досліджень в рамках науково-дослідних робіт: "Методи забезпечення функціональної стійкості розподілених інформаційних систем підприємств". Державний реєстраційний номер: 0121U108334, КПП, 2021-2025 рр. Терміни виконання: початок – 01.03.2021 р. закінчення – 28.02.2025 р; “Дослідження інтелектуальних комп'ютерних моделей та алгоритмів аналізу сигналів морського середовища”, договір № Д/020.01/0204.02/58/2020 від 23 грудня 2020 р. між КПП ім. Ігоря Сікорського та Інститутом Океанографічного Приладобудування Академії наук провінції

Шандунь (КНР) про виконання наукової теми; договір № DLN-20-DP-01 від 15 грудня 2020 р. (zareєстровано в КПІ ім. Ігоря Сікорського за № д/0201.01/0204.02/55/2020 від 23.12.2020р.) з надання Послуг з розробки програмного забезпечення між КПІ ім. Ігоря Сікорського та Товариством з обмеженою відповідальністю «Науково–виробниче підприємство «СИМВОЛ»

Мета і завдання досліджень.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності програмних засобів комп'ютерного моделювання сигналу дальнього гідроакустичного поля за рахунок удосконалення класичного методу нормальних мод та розроблення узагальненого методу для моделювання сигналу.

Основні наукові завдання досліджень, відповідно до мети, полягають в наступному:

1. Дослідити існуючі методи моделювання гідроакустичного поля, з метою вибору методу для подальшого використання при розробленні програмного забезпечення.
2. Проаналізувати існуюче програмне забезпечення моделювання гідроакустичних сигналів та визначити його переваги та недоліки для пошуку способів покращення існуючих методів моделювання.
3. Удосконалити класичний метод нормальних мод для моделювання сигналу дальнього поля на основі введення зміни швидкості звуку з глибиною та часової змінної з метою врахування особливостей розповсюдження звуку у водних середовищах.
4. Удосконалити класичний метод нормальних мод введенням вагових коефіцієнтів з метою врахування нелінійності морського середовища.
5. Розробити узагальнений метод нормальних мод на основі розроблених удосконалень: введення залежності зміни швидкості з глибиною, часової змінної та вагових коефіцієнтів.
6. Розробити методику проектування комп'ютерної моделі для програмного забезпечення моделювання сигналу на прикладі методу нормальних мод на основі методів.

7. На основі модельно-орієнтованого підходу розробити архітектуру програмного забезпечення та користувацький інтерфейс моделювання сигналу дальнього поля на основі введення вагових коефіцієнтів з метою врахування нелінійності морського середовища.

8. Розробити програмне забезпечення моделювання гідроакустичних сигналів дальнього поля та провести тестування з метою доведення коректності теоретичних результатів.

Об'єктом досліджень процес комп'ютерного моделювання гідроакустичних сигналів в дальньому полі.

Предметом досліджень методи, алгоритми та програмні засоби комп'ютерного моделювання гідроакустичних сигналів в дальньому полі.

Методи дослідження. Дослідження на основі гідроакустичної теорії, теоретичні основи фізичних процесів розповсюдження звуку у водному середовищі, комбінаторної теорії, аналітичного моделювання та дискретної оптимізації. Методи теорії обробки спостережень для аналізу експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів досліджень

1. Удосконалено класичний метод нормальних мод для моделювання гідроакустичного сигналу, який відрізняється від існуючих введенням залежностей швидкості звуку від глибини для врахування особливостей водного середовища та зміни акустичного тиску з часом.

2. Вперше розроблено узагальнений метод нормальних мод на основі врахування змінної швидкості звуку, часової змінної та введення вагових коефіцієнтів для визначення як лінійних, так і нелінійних випадків, що дозволить підвищити точність обрахунків акустичного тиску в хвилеводі.

3. Вперше розроблено архітектуру програмного забезпечення моделювання гідроакустичних сигналів на основі удосконаленого та узагальненого методів нормальних мод, яка до того ж відрізняється від існуючих можливістю задання різних параметрів середовища моделювання, які збільшує швидкість обрахунків на 30%, та впливають на побудову сценарію руху об'єкта спостереження. Практичне значення отриманих результатів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Вперше розроблено програмне забезпечення комплексної системи моделювання гідроакустичних сигналів на основі запропонованих удосконаленого методу. Зокрема в реалізації було запропоновано спосіб спрощення та пришвидшення обрахунків за використанням паралельних обчислень за законом Амдала. Впровадження зазначеного програмного забезпечення дозволяє з більшою точністю та швидкістю отримати результати моделювання розповсюдження звуку у водному середовищі.

2. Проведено аналіз ефективності запропонованих методів моделювання гідроакустичних сигналів. Аналіз показав, що, за результатами моделювання розповсюдження гідроакустичного сигналу в морському середовищі, розроблений узагальнений метод дозволяє зменшити час обрахунку в середньому на 30 % без погіршення точності отриманих результатів. Це надає можливість стверджувати, що ефективність моделювання гідроакустичних сигналів методом нормальних мод підвищується.

Результати досліджень прийняті до впровадження в Конструкторському бюро «Шторм» КПІ ім. Ігоря Сікорського (акт від 26.02.2025 р.), в навчальний процес кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисципліни «Інженерія даних та знань» для студентів освітнього рівня «Магістр» спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» денної та заочної форми навчання (акт від 26.02.2025 р.).

Перспективними шляхами досліджень є розроблення нових і удосконалення існуючих моделей та методів підвищення ефективності моделювання гідроакустичних явищ, зокрема розширення врахованих факторів, які можуть впливати на обрахунок.

Достовірність наукових результатів та практичних рекомендацій дисертації підтверджується коректним використанням відповідного математичного апарату та обґрунтованими теоретичними твердженнями, а також узгодженістю теоретичних результатів із результатами виконаних експериментальних досліджень.

У першому розділі проведено детальний аналіз існуючих методів моделювання гідроакустичного поля, а також досліджено існуюче програмне забезпечення, яке реалізовує описані методи моделювання. У розділі представлені математичні моделі та методи розповсюдження гідроакустичних хвиль у водному середовищі, аналізуються переваги та недоліки кожного з методів. Проведений аналіз показав, що всі розглянуті моделі адекватно описують акустичне поле в морському середовищі у межах своєї застосовності, а точність результатів аналізу визначається відповідністю заданих у моделі акустичних параметрів – вертикального розподілу швидкості звуку, профілю дна та його акустичних характеристик, параметрів реального середовища. Проте розглянуті моделі не дозволяють повною мірою врахувати нестационарні та хаотичні процеси в морському середовищі: хвилювання поверхні; течії та пов'язані з ними зміни розподілу акустичних параметрів по акваторії.

Променева модель найбільш придатна для аналізу поширення акустичних хвиль у дрібному морі на високих частотах $f > 400 \dots 500$ Гц на малих дальностях, що не перевищують 3-5 кратну глибину акваторії, для цих умов, але при використанні низьких частот переважна швидка польова модель. Але при аналізі поширення акустичних хвиль на велику дальність у дрібному морі з використанням низьких частот, слід віддати перевагу моделі нормальних мод. Найкращим способом розрахунку гідроакустичних полів великих відстанях за умов дрібного моря є метод нормальних мод. При використанні методу нормальних мод слід враховувати зміну постійної гравітаційної на трасі поширення хвилі. Метод нормальних мод був обраний через його здатність забезпечувати високу точність, універсальність і ефективність для роботи з багатошаровими морськими середовищами на великих відстанях. Він є кращим за інші методи, оскільки дозволяє глибше враховувати складність середовища і забезпечує точні результати, що відповідає меті дослідження.

На основі проведеного аналізу методів і засобів організації сучасних систем моделювання розповсюдження звуку в водних середовищах запропоновано актуальне наукове завдання підвищення ефективності моделювання за допомогою методу нормальних мод на основі введенням змінної швидкості, змінної часу та вагових коефіцієнтів для врахування нелінійності моделі морського середовища.

У другому розділі розглянуто особливості гідроакустичних моделей: детально описано фізичні явища, пов'язані з розповсюдженням гідроакустичних сигналів, такі як заломлення, дифракція, відбиття, поглинання та розсіювання звуку. Також проведений аналіз параметрів водного середовища, які потрібно взяти до уваги при моделюванні, такі як температура, солоність, густина водного прошарку.

Проаналізовані також втрати під час поширення акустичних хвиль. Морське дно являє собою відбиває і розсіює границю, що має ряд характеристик, постійних у часі. Морське дно є шаруватим середовищем, що характеризується щільністю. Його склад може змінюватись від твердих порід до м'яких ґрунтів, тому швидкість звуку поступово або різко змінюється з глибиною. Також через різну стратифікацію донних відкладень на багатьох ділянках звук часто поглинається дном і заломлюється або відбивається всередину. Таким чином, морське дно є середовищем, що поширюється і характеризується як швидкістю зсуву, так і швидкістю звуку стиснення. Підводні хребти та підводні гори можуть ефективно блокувати поширення звуку.

Головними причинами, що впливають на роботу гідроакустичної станції, що вловлює сигнали, що взаємодіють з дном моря, є втрати через поглинання звуку в ґрунті, а також відображення, розсіювання, заломлення та донна реверберація. Перелічені фактори визначають гідроакустичні характеристики дна моря, які у кількісному вигляді надаються за допомогою відповідних коефіцієнтів та їх частотних та кутових залежностей.

Усі розглянуті випадки поширення звуку враховували лише вертикальну рефракцію акустичних променів. Зміна швидкості звуку додатково в горизонтальній площині призводить до загальної просторової деформації поля, зміщення траєкторій променів, фазовим спотворень і зміни параметрів залежності зниження інтенсивності поля з відстанню.

У третьому розділі детально описується постановка задачі пошуку акустичного тиску та її вирішення методом нормальних мод. Для вдосконалення пропонується введення змінної швидкості звуку, а також часової змінної. Після виведення формули обрахунку зміни акустичного тиску у водному середовищі з часом, для опису мод вводяться вагові коефіцієнти, використовуючи поліном Чебишова. Для виведених

методів було проведено статистичне обчислення для визначення функції апроксимування.

На основі кількісного аналізу, з використанням конкретних даних можна зробити висновок, що використання коефіцієнтів Чебишова в задачі моделювання розповсюдження звукових хвиль з часовою залежністю є доцільним та ефективним, зокрема даний метод показав високу стійкість до шуму.

У четвертому розділі представлено процес розробки програмного комплексу моделювання водного середовища та розповсюдження звуку у ньому. Перед моделюванням на основі проведеного аналізу предметної області, застосовуючи модельно-орієнтовний підхід до побудови архітектури, було створено онтологічну модель теоретичного матеріалу, а також онтологічна модель програмного забезпечення, яка дозволила перейти до ефективної розробки програмного забезпечення. Особлива увага приділяється розробці графічного інтерфейсу, який забезпечує зручність користування та можливість налаштування сценаріїв моделювання. Представлені результати демонструють ефективність програмного комплексу в умовах реальних сценаріїв поширення звуку в морі. Окремо аналізуються можливості підвищення ефективності програмного забезпечення шляхом оптимізації алгоритмів обчислень і використання сучасних обчислювальних технологій.

Особистий внесок здобувача.

Основні результати наведені в дисертаційному дослідженні отримані автором самостійно. В роботі [1] розглянуто моделювання розповсюдження гідроакустичного сигналу променевим методом; в роботі [2] автором наведено приклад моделювання траєкторії пересування корабля; в роботі [3] структура бази знань моделювання гідроакустичних полів на основі променевої теорії; в роботі [4] коефіцієнти Чебишова в моделюванні хвильового процесу методом нормальних мод.

Апробація результатів дисертації.

Основні наукові результати досліджень включені до дисертаційного дослідження, доповідалися і обговорювалися на конференціях:

1. Пироговська Т.В., Євтушенко А.М., Аналіз параметрів моделювання гідроакустичного поля променевим методом. I Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення»: тези доповіді, 2023, м. Київ, с. 104-108.

2. Пироговська Т.В., Мусієнко А.П., Аналіз алгоритму пошуку траєкторії об'єкту у морському середовищі. III Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку», тези доповіді, 2023, м. Київ, с. 251-253.

3. Пироговська Т.В., Мусієнко А.П., Моделювання сигналу дальнього поля на основі використання коефіцієнтів Чебишева. II Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення»: тези доповіді, 2024, м. Київ, ст.13-15.

Публікації. Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковані в 7 наукових працях, серед яких 4 наукових статей в фахових журналах [1 - 4], затверджених МОН України, а також 3 публікації в матеріалах наукових конференцій [5 - 7].

Обсяг та структура дисертації. Дисертаційна робота загальним обсягом 174 сторінки машинописного тексту складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел із 122 найменувань та додатків. Дисертація містить 27 рисунків, 7 таблиць і 3 додатки.

РОЗДІЛ 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Сучасні дослідження світового океану вимагають більшої деталізації та аналізу експериментальних даних, що посилює вимоги до деталізації його опису. З розвитком комп'ютерної техніки збільшилась можливість акустичного моделювання, що сприяє розвитку теоретичних основ досліджень гідроакустики. Під час таких досліджень виникає питання про поведінку звукових хвиль під водою, а саме їх зміна з впливом часу. Як правило, досліджуються розповсюдження не самих звукових хвиль, а динаміка їх параметрів. В зв'язку з чим доцільно встановити дискретну та неперервну залежності між рівнянням нормальних мод сигнал яким генерується імпульсним нерухомим джерелом з плином часу. Побудувати дискретну модель процесу та дослідити дану модель на адекватність та оцінити точність апроксимації.

На утворення та поширення звукових хвиль в водах океану мають вплив такі параметри системи, як погодні умови, солоність та густина водного середовища, просторові та енергетичні характеристики джерела випромінювання сигналу [1]. Дослідження утворення гідроакустичних каналів, розроблення підводного зв'язку та телеметрії вимагають більшої деталізації в заданні вхідних параметрів [2]. В роботах [3-4] розглянуто генерацію імпульсів сферичним джерелом біля ідеальної границі та питання інтерференції взаємодії плоских та сферичних хвиль. Постановка хвильового рівняння має передбачати процес поширення акустичних збурень з врахуванням впливу відбитого та розсіяного поля. Одним з способів вирішення даного питання є моделювання звукового поля методом нормальних хвиль. Розроблення, моделювання та використання такого підходу потребує введення часової залежності між змінними динамічної системи [4]. Це дозволить проводити більш глибоке дослідження процесу поширення звукових хвиль в підводному каналі, їх акустичних тиск в вертикальних перетиках середовища та встановлення коефіцієнтів збурення полі під час роботи з джерелом.

Такий підхід до моделювання потребує аналізу класичних моделей дослідження хвильових процесів. В роботі [5] розглядається двовимірний аналітичний модель хвильового рівняння в циліндричному хвилеводі. Оцінка похибки такого підходу наведена авторами в роботі [6]. Авторами [7] визначається оцінка відстані від випромінювача до початку координат та опис акустичного поля, лише через дискретні структури. В ході роботи [7] розглянутий аналітичний розв'язок для неоднорідного гідроакустичного поля на основі методу нормальних мод. Такий підхід враховує вплив донного прошарку на характеристики поля.

Найбільш ефективно застосування методу нормальних мод є для випромінювачів, що генерують звук на низькій частоті. В роботі [8] показано, що шум корабля, що віддаляється, можна віднести до низькочастотного. Під час подібних досліджень звукових хвиль та їх випромінювача, досить часто використовується тиск та акустична енергія [9], що визначені в кожній точці середовища. В [9] розглядаються спектри судового шуму та шуму перевезення з використанням методу нормальних хвиль. Для оцінки точності методу використовуються дані отримані для профілю Мунка. Дно розглядається як шар з різною швидкістю та щільністю, тож метод можливо застосовувати для більш широкого спектру задач.

В більшості розглянутих задач, перехід до тривимірної моделі методу нормальних хвиль має певну проблематику пов'язану зі стійкістю нелінійних нормальних мод [10]. Тривимірний модель, при застосуванні методу, не враховує в явному вигляді змінну часу. Вважається, що застосування методу нормальних мод можливе при умові, що моди є незмінними протягом певного часового періоду [11]. Проте, при дослідженні випромінювання точкового джерела циліндричного хвилеводу, врахування часової змінної є необхідним.

1.1. Аналіз існуючих математичних моделей розповсюдження звуку в морі

Основою для побудови моделей поширення акустичних хвиль в морському середовищі є хвильове рівняння або рівняння Гельмгольца для аналізу стаціонарного режиму [13].

$$\alpha_1 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} + \alpha_2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} + \dots + \alpha_n \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_n^2} + F\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_1}; \frac{\partial \Phi}{\partial x_2}; \dots; \frac{\partial \Phi}{\partial x_n}; \Phi\right) = 0 \quad (1.1)$$

У математичній фізиці прийнята наступна класифікація рівняння в частинних похідних. Рівняння називається гіперболічним, якщо знак хоча б одного з коефіцієнтів α_i відрізняється від знака інших коефіцієнтів. Якщо всі α_i мають однаковий знак, рівняння називається еліптичним. Якщо хоча б один із коефіцієнтів α_i дорівнює нулю, то рівняння називають параболічним [14]. З наведеної класифікації випливає, що хвильове рівняння - гіперболічне, а рівняння Гельмгольца еліптичне. Методи вирішення цих рівнянь суттєво відрізняються.

Хвильове рівняння частіше використовують при вивченні нестационарних процесів, наприклад в сейсмології; в акустиці і гідроакустиці в більшості випадків розглядають рівняння Гельмгольца [15]. Параболічне рівняння (рівняння дифузії або теплопровідності) до останнього часу не використовувалося в акустиці, але з розвитком наближених методів розрахунку хвильових полів був розроблений так званий «метод параболічних рівнянь».

Хвильове рівняння або рівняння Гельмгольца разом із відповідними початковими та граничними умовами визначає крайову задачу відповідного рівняння в частинних похідних [16]. Така задача може бути вирішена безпосередньо методами математичної фізики та обчислювальної математики.

Для безпосереднього вирішення крайової задачі хвильового рівняння використовується метод кінцевої різниці в часовій області (FDTD). Для розрахунку поширення акустичних хвиль в усталеному стані використовується MSE або метод скінченних елементів (MSE) [17].

Перераховані способи можна вважати найбільш точними і універсальними, оскільки при будівництві не вносяться додаткові спрощення.

До недоліків методів можна віднести складність побудови розрахункових алгоритмів, складність адекватного врахування реальних граничних умов, низьку наочність результатів розрахунку [18].

Усі інші методи розрахунку акустичних полів у морському середовищі базуються на рівнянні Гельмгольца (аналіз стаціонарного режиму) і при побудові використовують деякі припущення, які дозволяють розділяти змінні та спрощують вирішення вихідної крайової задачі [19]. Залежно від конкретних умов морського середовища зроблені припущення можуть бути виправданими, а розглянутий метод забезпечить прийнятну точність розрахунків [20].

На рисунку 1.1.1 наведено особливості побудови рішень для різних методів розрахунку поширення акустичних сигналів у морському середовищі [21].

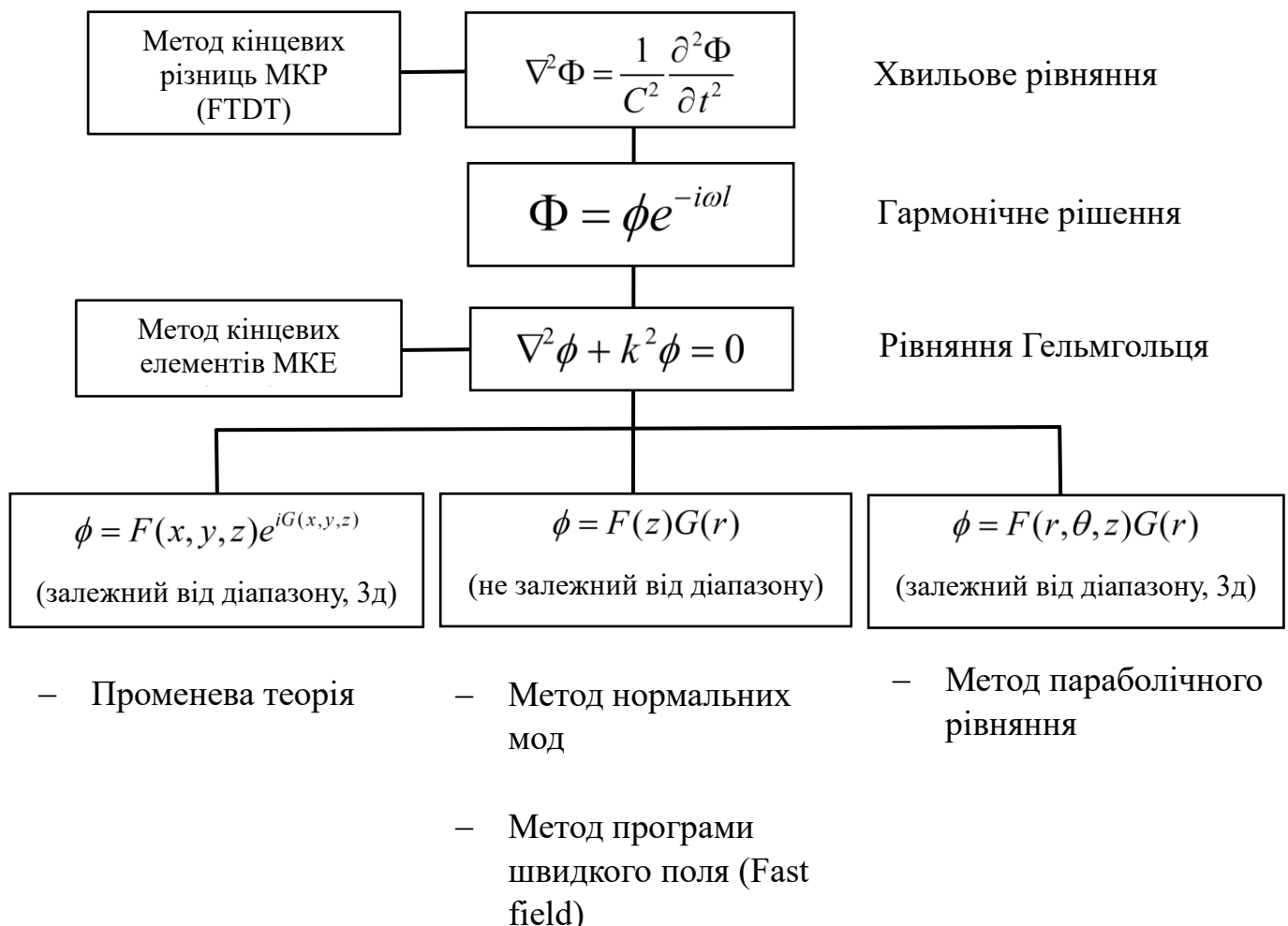


Рисунок 1.1 Особливості побудови рішень для різних методів розрахунку розповсюдження акустичних сигналів.

Променевий метод базується на принципі Ферма. Сучасне розуміння променевої апроксимації як наближеного методу теорії хвиль починається з робіт П.

Дебая (1931), С. Л. Соболева (1930), С.М. Ритова (1938) [22-24]. Метод оперує повільно змінюваною амплітудою F вздовж променя та ейконалом – швидкозмінною функцією G , яка визначає фазову структуру поля, тобто. система хвильових фронтів і градієнтів цих променів.

Метод нормальних мод (Normal mode) для розрахунку акустичного поля в мілкому морі вперше використав К. Пекеріс у 1946 році [25]. Змінні z і r у рівнянні розділені, в результаті чого утворюється система двох рівнянь: розв'язок якої необхідно шукати у вигляді дискретної суми нормальних хвиль: $F(z)$ – функція профілів моди, що визначаються, $G(r)$ – функція залежності фази нормальної хвилі від відстань. Кожна мода відповідає власному вертикальному та горизонтальному хвильовому числу, визначеному з дисперсійного рівняння [26].

Ідея програми швидкого поля (Fast field) була запропонована Ді Наполі в 1967 році. До рівняння Гельмгольца застосовано перетворення Фур'є-Бесселя [27]:

$$p(\xi, z) = \int_0^\infty p(r, z) J_0(\xi r) r dr \quad (1.2)$$

При цьому вихідна задача зводиться до розв'язку значно простішого «вертикального» рівняння Гельмгольца.

Метод параболічних рівнянь базується на розв'язуванні крайових задач для параболічних хвильових рівнянь типу Шредінгера, які апроксимують рівняння Гельмгольца. Такий підхід використовується для моделювання переважно односпрямованих хвильових процесів.

1.1.1. Дослідження обраних математичних моделей розповсюдження звуку в морі

Променевий метод

Вихідним рівнянням для розрахунку поля точкового джерела тону, розташованого в плоскому хвилеводі в точці з координатами (r_s, z_s) , є рівняння Гельмгольца [15]:

$$\nabla^2 p(r, z) + k^2(z) p(r, z) = -\delta(r - r_s) \delta(z - z_s) / r \quad (1.3)$$

де $p(r, z)$ – акустичне поле (тут потенціал швидкості пов’язаний з акустичним тиском),
 $k(z) = \omega/c(z)$ – хвильове число в шарі води,
 $c(z)$ – профіль швидкості звуку,
 δ - дельта-функція Дірака.

Рішення шукається у вигляді розкладання Дебая, обмеженого першим періодом ряду [28]

$$p(r, z) = A(r, z) \exp(ik_0 \phi(r, z)), \quad (1.4)$$

де $k_0 = \omega/c_0$, c_0 – швидкість звуку в місці джерела,
 $A(r, z)$ – амплітуда, що повільно змінюється вздовж пучка,
 $\phi(r, z)$ – ейконал – швидкозмінна функція, що визначає фазову структуру поля, тобто систему хвильових фронтів і градієнтів до них.

Підставляючи вираз $p(r, z)$ у рівняння Гельмгольца, відокремлюючи дійсну та уявну частини, прирівнюючи їх до нуля та враховуючи, що амплітуда хвилі вздовж променя змінюється досить повільно, отримуємо рівняння ейконала для функції $\phi(r, z)$, а для $A(r, z)$ рівняння переносу [28]:

$$\begin{aligned} (\nabla \phi(r, z))^2 &= -c_0^2 / c^2(z), \\ 2\nabla \phi(r, z) \cdot \nabla A + A \Delta \phi(r, z) &= 0. \end{aligned}$$

Тривимірна задача фактично зводиться до набагато простішої двовимірної.

Рішення рівняння ейконала зводиться до інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь шляхом введення системи променів, перпендикулярних хвильовим фронтам $\phi(r, z)$.

Перехід від декартових до «променевих» координат

$$\begin{aligned} \frac{dr(s)}{ds} &= c(s)\mu(s), & \frac{d\mu(s)}{ds} &= \partial c(s) / \partial r / c^2(s), & \frac{dz(s)}{ds} &= c(s)\eta(s); \\ \frac{d\eta(s)}{ds} &= -\partial c(s) / \partial z / c^2(s) \end{aligned}$$

де $r(s), z(s)$ - функції радіальних координат точок променя в залежності від геометричної довжини променя;
 $(w(s), \dot{\eta}(s))$ - компоненти вектора, дотичні до променя в точці.

Початкові умови трасування променів наступні: $r(0) = r_s$, $z(0) = z_s$, $\mu(0) = \cos\chi_s$, $\dot{\eta}(0) = \sin\chi_s$, χ_s – обраний кут нахилу, коли промінь Γ виходить із джерела. Вздовж променя $\Gamma(r(s), z(s))$ розраховується ейконал $\phi(r, z)$, який має значення довжини акустичного шляху:

$$\phi(s) = \int_r c_0 / c(s) ds$$

Амплітуда вздовж променя обчислюється з рівняння передачі, враховує збереження потоку потужності всередині променевої трубки, що геометрично розширюється, і виявляється обернено пропорційною кореню квадратному з площі її поперечного перерізу. Декомпозиція трасування променів не застосовується в геометричних зонах тіні, де немає променів, і в околицях каустик (огинаючих конгруенцій променів) [29].

Метод нормальних мод

Вихідним рівнянням для розрахунку поля точкового джерела тону, розташованого в плоскому хвилеводі в точці з координатами (r_s, z_s) , є рівняння Гельмгольца[15]:

$$\nabla^2 p(r, z) + k^2(z) p(r, z) = -\delta(r - r_s) \delta(z - z_s) / r \quad (1.5)$$

де $p(r, z)$ – акустичне поле (тут потенціал швидкості пов’язаний з акустичним тиском),

$k(z) = \omega/c(z)$ – хвильове число в шарі води,

$c(z)$ – профіль швидкості звуку,

δ - дельта-функція Дірака.

Метод нормальних мод для розрахунку акустичного поля в мілководному морі вперше використав К. Пекеріс у 1946 році [25]. Змінні z і r у рівнянні Гельмгольца розділені, в результаті чого утворюється система двох рівнянь, розв’язок яких потрібно шукати у вигляді дискретної суми нормальних хвиль [30]:

$$p(r, z) = \sum_{l=1}^{\infty} Z_l(z) R_l(r), \quad (1.6)$$

де $Z_l(z)$ є функціями профілів мод, які необхідно визначити,

$R_i(r)$ є функцією залежності фази нормальної хвилі від відстані.

Кожна мода має своє вертикальне і горизонтальне хвильове число, визначене з дисперсійного рівняння виду $\xi(\omega) = 0$, якому на частоті ω задовольняється не більше l власних значень ξ_1 .

Перше рівняння системи, відносно z – вертикально однорідне

$$\frac{(d^2 p(\xi, z))}{dz^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2(z)} - \xi^2 \right) p(\xi, z) = 0$$

$$p(\xi, z) = 0 \text{ при } z = 0,$$

$$\frac{p(\xi, z)}{\partial p(\xi, z) / \partial z} = -Z_{in} \text{ при } z = h.$$

де Z_m – нижній вхідний опір,

ξ — горизонтальне хвильове число (проекція хвильового вектора k на вісь відстані r).

Встановлення імпедансу граничних умов дозволяє ітеративно обчислювати імпеданс, від шару до шару, починаючи з напівпростору, у зворотному порядку, і, нарешті, обчислювати результуючий коефіцієнт відбиття V від низу [31].

Функція $p(\xi, z)$, яка називається поперечною функцією Гріна, для довільних профілів $c(z)$ зазвичай обчислюється матричним методом, запропонованим Томсоном і Хаскеллом. Поперечна функція Гріна має досить складну структуру, і принцип її визначення полягає в наступному. Вертикально неоднорідні колони води і дна розділені на кінцеву кількість шарів, достатню для того, щоб їх параметри вважалися постійними в межах кожного шару. Верхня межа системи вважається абсолютно м'якою, а нижня - у вигляді однорідного пружного півпростору. У кожному шарі рішення для поля представлені у вигляді набору падаючої та відбитої хвиль. Щоб знайти рішення в системі шарів, поля на кордонах «зшиваються» за допомогою умов «інтерфейсу».

Друге рівняння для r в циліндричних координатах має вигляд

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) + \xi^2 R(r) = -Z(z_s) \frac{\delta(r)}{r}$$

Умови випромінювання першого рівняння вимагають згасання нормальної хвилі при $z \rightarrow \infty$, другого - при $r \rightarrow \infty$. Вирішення другого рівняння, з урахуванням умови в джерелі, містить функцію Ханкеля [32]:

$$R_i(r) = (i/4) Z_i(z_s) H_0^{(1)}(\xi_i r)$$

Результуюче поле у вигляді суми нормальних хвиль подається у вигляді

$$p(r, z) = \sum_{l=1}^L Z_l(z) Z_l(z_s) H_0^{(1)}(\xi_l r) \quad (1.7)$$

Метод нормальної хвилі враховує лише дискретний спектр горизонтальних хвильових чисел і нехтує безперервним спектром, що відповідає екстремальним кутам нахилу еквівалентного модального пучка, тому зі зменшенням відстані до джерела похибка розрахунку також зростає, але, на відміну від ВРР, вона не має обмежень із збільшенням відстані.

Особливості методу нормальних мод.

У методі нормальних мод акустичне поле у водному середовищі представляється як суперпозиція так званих нормальних мод - системи власних хвиль вертикально неоднорідного хвильоводу, обмеженого морським дном і поверхнею води. В цьому випадку властивості середовища не залежать від положення на горизонтальній площині - глибина моря і профіль швидкості звуку постійні по всій акваторії [33].

Власні хвилі хвильоводу утворюють повну систему ортогональних функцій. У цьому випадку вертикальні розподіли полів власних хвиль і константи їх поширення знаходяться в результаті розв'язання (див. вище) відповідної крайової задачі. Зі складним вертикальним профілем швидкості звуку обчислення властивостей природних хвиль є складною обчислювальною проблемою.

Константи поширення власних хвиль залежать від співвідношення робочої довжини хвилі джерела акустичного випромінювання до критичної довжини хвилі відповідної моди. Якщо робоча довжина хвилі перевищує критичну, то відповідна мода поширюється по хвильоводу зі значним загасанням і фактично існує лише в околицях джерела випромінювання, де вони утворюють т.зв. «реактивні поля». На

значні відстані (в дальню зону випромінювача) можуть поширюватися лише хвилеводні моди нижчого порядку, де робоча довжина хвилі менше критичної. Кількість таких режимів залежить від співвідношення робочої довжини хвилі та глибини акваторії.

Метод параболічних рівнянь

Метод параболічного рівняння запропоновано Таппертом у 1973р. для вирішення завдання розповсюдження акустичних хвиль у підводному звуковому каналі глибокого моря [34].

Поширення акустичних сигналів в океані на великі відстані можливе завдяки існуванню підводного звукового каналу (SOFAR), який діє подібно до хвилеводу і змушує акустичні хвилі залишатися в межах області, зайнятої водою. Це перешкоджає їх взаємодії з дном океану, яке в цілому є більш поглинаючим середовищем, ніж вода. Методи параболічного рівняння ґрунтуються на геометричних конфігураціях, що виникають при розгляді хвиль у звуковому каналі. Під поширенням великі відстані ми маємо на увазі поширення до зони конвергенції (і далі), що становить близько 50-60 км. Оскільки глибина океану в середньому коливається в межах 4-5 км, ми бачимо, що поширення по звуковому каналу відбувається головним чином у хвилеводі, тонкому по вертикалі, але дуже витягнутому по горизонталі [35]. Ця характерна конфігурація і уможливлює параболічне наближення.

Таким чином, параболічне наближення в підводній акустиці істотно відрізняється від двох інших головних типів наближень, що зазвичай використовуються. Методи геометричної акустики засновані на припущенні, що довжини хвиль дуже малі і дифракційними ефектами можна знехтувати всюди, за винятком, можливо, кількох невеликих областей, а в методах поділу змінних (таких як розкладання за нормальними модами) використано припущення, що океан строго горизонтально стратифікований, Отже взаємодія між хвилеводними модами зневажливо мало.

Застосовуючи методи параболічного наближення, ми враховуємо як усі дифракційні ефекти, пов'язані з характерною геометрією звукового каналу в океані (отже, ці методи застосовуються аж до значно нижчих частот, ніж геометрична

акустика), і взаємодія між хвильоводними модами. Розгляд ведеться більш реалістичному проти методом поділу змінних разі нестратифіцированного океану.

Поширення великі відстані відбувається обов'язково низьких частотах, зазвичай які перевищують приблизно 500 Гц. Це пояснюється тим, що об'ємне поглинання акустичних хвиль у морській воді швидко зростає на частотах понад 1000 Гц, а спектр шуму океану часто має широкий мінімум в діапазоні від 10 до декількох сотень герц.

Найбільший інтерес становить частота близько 150 Гц. Відповідна довжина хвилі дорівнює приблизно 10 м, тобто вона дуже мала в порівнянні з товщиною звукового каналу (близько 2 км), так що поширюватиметься велика кількість мод.

Максимальний кут поширення, званий також "граничним кутом", дається законом Снелліуса [36]:

$$\theta_l = \arccos(c_{\min} / c_{\max}) \approx (2\Delta c / c_0)^{1/2} \quad (1.8)$$

де θ – кут поширення щодо горизонталі,

c_{\min} – мінімум швидкості звуку (на осі звукового каналу),

c_{\max} – максимум швидкості звуку (на дні океану),

$\Delta c = c_{\max} - c_{\min}$ і c_0 – деяка середня швидкість звуку.

Зазвичай $c_0 = 1500$ м / с, $\Delta c / c_0 < 0,04$ і, отже, $\theta < 16^\circ$. Таким чином, найбільший з кутів поширення променів, що в основному визначають акустичне поле на великих відстанях, дуже невеликий. Цей факт є основою параболічного наближення.

Фактично при поширенні в звуковому каналі найбільша частина енергії припадає на частку сектора кутів з півшириною 5° по вертикалі, і розповсюдження такого типу можна розглядати як те, що відбувається в послідовності тонких лінз. Ефективна апертура 2В становить приблизно 4 км, фокусна відстань $R = 25$ км, фокальний кут $\theta = 5^\circ$.

У разі низькочастотного джерела на відстанях по горизонталі, що не перевищують кілька глибин океану, акустична енергія, що розповсюджується під кутами, більшими за деякий граничний кут, втрачається через взаємодію з поглинаючим дном. Залишаються лише захоплені моди, що розповсюджуються під малими кутами до горизонталі і приводять переважно до циліндричного розходження.

Природним наближенням, що відповідає цій характерній геометричній конфігурації, є наближення малих кутів (вузькосмугове, параболічне).

Основна ідея полягає в тому, що в першому наближенні всі істотні акустичні хвилі на низьких частотах поширюються практично горизонтально від джерела. Отже, акустичне поле можна представити як «відхідну» функцію Ханкеля, промодульовану огинаючою, що повільно змінюється з глибиною, відстанню та азимутом [34]:

$$p(z, r, \phi) = \psi(z, r, \phi) H_0^{(1)}(k_0 r) \quad (1.9)$$

Очікується, що така апроксимація виявиться гарною тільки в дальньому полі точкового джерела, де $k_0 r \gg 1$ і $H_0^{(1)}(k_0 r) \sim (2 / i \pi k_0 r)^{1/2} e^{i k_0 r}$

Основне рівняння методу параболічного рівняння у підводній акустиці:

$$2i k_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + k_0^2 [n^2(z, r, \phi) - 1 + i v(z, r, \phi)] \psi = 0 \quad (1.10)$$

Це рівняння особливо корисно при розрахунку щодо вузьких пучків, що становлять інтерес у разі рознесених простором приймачів, які виділяють лише вузьку смугу напрямків, або джерел, що дають спрямовану картину випромінювання.

Найбільш широко застосовується в підводній акустиці параболічне хвильове рівняння виходить, якщо знехтувати азимутальною похідною ϕ . Це не означає, що передбачається циліндрична симетрія поля, але вказує на можливість знехтувати розсіюванням з одного азимутального напрямку до іншого. У цьому випадку ми отримуємо

$$2i k_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 [n^2(z, r) - 1 + i v(z, r)] \psi = 0, \quad (1.11)$$

де залежність n і v від ϕ не вказується, аналогічно тому, як ми раніше опустили їхню явну залежність від часу. У практичних додатках, звичайно, слід вибирати функції n і v (які містять також інформацію про глибину) відповідно до конкретної обстановки, часу доби, сезону тощо. д., за яких потрібно визначити звукове поле [35].

Вираз відносної інтенсивності звуку від точкового джерела можна записати у вигляді

$$TL = 10 \lg[|p(z, r)|^2 / (p_0 / r_0)^2] = 10 \lg[\frac{2r_0^2}{\pi k_0 r p_0^2} |\psi(z, r)|^2] \quad (1.12)$$

де p_0 – акустичний тиск точкового джерела на одиничній відстані r_0 .

Для обчислення акустичних полів від джерел, що не є точковими випромінювачами, завжди можна скористатися принципом лінійної суперпозиції і скласти послідовно безліч полів джерел описаного вище типу [36]. Однак на практиці буває зручніше безпосередньо моделювати розподіл акустичної енергії, що випромінюється, від реального джерела. Оскільки ці розподілу зазвичай виражають у вигляді діаграми спрямованості далекого поля і ця інформація необхідна для початку інтегрування параболічного рівняння хвильового, то метод параболічного рівняння цілком придатний для розгляду широкого класу джерел (типу спрямованих випромінювачів і т. д.).

Метод програми швидкого поля (Fast-field program method)

В даному методі до рівняння Гельмгольца застосовується наступне перетворення[37]:

$$p(\xi, z) = \int_0^\infty p(r, z) J_0(\xi r) r dr, \quad (1.13)$$

що призводить до «вертикального» неоднорідного рівняння Гельмгольца:

$$\frac{d^2 p(\xi, z)}{dz^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2(z)} - \xi^2 \right) p(\xi, z) = \delta(z - z_0). \quad (1.14)$$

Граничними умовами методу тоді будуть:

$$p(\xi, z) = 0 \text{ при } z = 0,$$

$$\frac{p(\xi, z)}{\partial p(\xi, z) / \partial z} = -Z_m \text{ при } z = h$$

де Z_m - вхідний імпеданс дна [37]. Тут горизонтальне хвильове число – проекція хвильового вектора k на вісь відстаней r .

Імпедансне завдання граничних умов дає можливість рекурентно перераховувати імпеданс від шару до шару, починаючи від напівпростору, у зворотному порядку, і в результаті обчислити результуючий коефіцієнт відображення V від дна.

Функцію $p(\xi, z)$, звану поперечною функцією Гріна рівняння для довільних профілів $c(z)$, зазвичай розраховують матричним методом, запропонованим Томсон і Хаскелл. Поперечна функція Гріна має досить складну структуру і принцип її визначення полягає в наступному. Неоднорідні по вертикалі водна і донна товщі розбиваються на кінцеве число шарів, достатню для того, щоб можна вважати їхні параметри постійними всередині кожного шару. Верхня межа системи вважається абсолютно м'якою, нижній шар приймають у вигляді однорідного пружного півпростору. У кожному шарі рішення для поля представляють у вигляді сукупності падаючих та відбитих хвиль. Для знаходження рішення в системі шарів поля на кордонах зшиваються за допомогою інтерфейсних умов. Коли поперечна функція Гріна $p(\xi, z)$ знайдена, поле $p(r, z)$ відновлюють за допомогою зворотного перетворення Фур'є-Бесселя [38]:

$$p(r, z) = \int_0^{\infty} p(\xi, z) J_0(\xi r) \xi d\xi \quad (1.15)$$

Дана формула є поданням рішення у вигляді спектрального інтеграла. Відомо, що ядро $p(\xi, z)$ швидко згасає для $\xi > \omega / \min(c(z))$. Таким чином, верхню межу в інтегралі обмежують деяким ξ_{\max} . Далі, у цій формулі функція Бесселя замінюється на півсуму функцій Ханкеля першого та другого роду, відбирається рішення у вигляді розбіжної від джерела хвилі, і функція Ханкеля першого роду замінюється першим членом асимптотичного уявлення, після чого поле можна шукати у вигляді [39]:

$$p(r, z) \approx \frac{\exp(i\pi / 4)}{\sqrt{2\pi r}} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} p(\xi, z) \sqrt{\xi} \exp(\xi r) d\xi \quad (1.16)$$

Інтеграл збігається з формулою перетворення Фур'є, тому поле може бути розраховане на основі стандартного алгоритму швидкого перетворення Фур'є (БПФ). У методі ПШП, починаючи з рівняння Гельмгольца, вводиться лише одне наближення – заміна функції Ханкеля її асимптотикою [40].

У метода ПШП і метода нормальних мод є спільні риси – обидва методи розрахунку акустичного поля використовують «вертикальне» рівняння Гельмгольца.

Методи кінцевих різниць у підводній акустиці

Метод скінченних різниць (FDM) — широко використовуваний чисельний метод у підводній акустиці для моделювання поширення хвиль у підводному середовищі. Цей метод особливо ефективний при розв'язанні диференціальних рівнянь у частинних похідних, які описують звукові хвилі, дозволяючи дослідникам моделювати складні сценарії, пов'язані з поширенням звуку через різноманітні середовища [41].

Методи скінченних різниць передбачають дискретизацію рівнянь безперервної хвилі в сітку або сітку. Цей процес перетворює рівняння на набір алгебраїчних рівнянь, які можна розв'язувати чисельно. Просторові та часові області можна розділити на невеликі прирости, щоб похідну можна було апроксимувати за допомогою кінцевих різниць.

FDM може імітувати поширення акустичних і пружних хвиль на різних частотах. Ви можете моделювати такі сценарії, як підводні акустичні Т-фази, які є сейсмічними хвилями, породженими підводними вибухами чи іншими збуреннями. Цей метод дозволяє детально проаналізувати, як ці хвилі взаємодіють з геологічними особливостями та морським середовищем [42].

Однією з важливих переваг FDM є його здатність обробляти складні граничні умови та різноманітні властивості середовищ, такі як профілі швидкості звуку та топографічні варіації з глибиною. Ця гнучкість робить його ідеальним для моделювання реалістичних підводних сценаріїв, таких як перетворення сигналів сонара в сейсмічну енергію на межі океану та суші.

Метод кінцевих елементів(FEM) — потужний чисельний метод, який широко використовується в акустиці для аналізу та вирішення проблем, пов'язаних із поширенням звуку, випромінюванням і взаємодією зі структурами. Цей метод є особливо вигідним для складних геометрій і граничних умов, що робить його кращим вибором для різноманітних акустичних застосувань [43].

FEM працює шляхом поділу акустичної області на менші, простіші частини, які називаються кінцевими елементами. Ці елементи можуть бути одновимірними (відрізки), двовимірними (трикутники або квадрати) або тривимірними (тетраедри

або кубу). Акустичне поле апроксимується в межах кожного елемента за допомогою функції форми.

Акустична задача формулюється з використанням варіаційного принципу, який призводить до системи алгебраїчних рівнянь, які можна розв'язати чисельно. Цей підхід дозволяє включати різні фізичні явища, такі як затухання та нелінійні ефекти.

FEM особливо підходить для моделювання складних структур і меж, включаючи неправильні форми та матеріали, що перекриваються. Ця гнучкість дозволяє точно імітувати поширення звуку в таких середовищах, як кімнати, транспортні засоби та тіло людини [44].

Удосконалені реалізації FEM можуть підвищити точність за допомогою факторів вищого порядку. Ці елементи дозволяють краще представити акустичне поле, особливо в областях із високим градієнтом, наприклад на кордонах або поблизу джерел.

1.1.2. Переваги та недоліки описаних методів

Переваги променевого методу методу:

- Легко побудувати шляхи променів і отримати візуальну картину розподілу інтенсивності звуку.
- Враховується нерівність дна (при двовимірному підході). Нижні профілі та вертикальні профілі швидкості звуку для різних напрямків азимута можуть відрізнятися
- Реальні граничні умови легко враховуються.
- Спрямовані властивості джерела звуку легко враховуються.
- Неоднорідності на шляху розповсюдження легко враховуються.

Обмеження променевого методу:

При використанні променевого методу враховується тільки радіальний профіль дна, азимутальний профіль не враховується. При цьому промінь завжди залишається в заданій вертикальній площині. Але при розрахунку акустичного поля на великій

площі, коли при поширенні хвилі відбувається значна кількість відбиттів від дна з нахилами в різних площинах, це може викликати значні похибки.

Основною вимогою для забезпечення коректності розрахунків променевим методом є виконання умови [45]:

$$\alpha\lambda \ll 1$$

де $\alpha = \frac{1}{c} \left| \frac{\partial C}{\partial z} \right|$ - відносний градієнт швидкості звуку C на глибині, 1/м;

λ – довжина звукової хвилі, м.

Враховуючи, що максимальні значення градієнтів швидкості звуку в морі складають:

$\alpha \approx 4 \cdot 10^{(-3)} 1/м$ – для негативної рефракції;

$\alpha \approx 5 \cdot 10^{(-5)} 1/м$ – з позитивною рефракцією.

Отримуємо $\lambda \ll 250$ м, $f \gg 6$ Гц. Застосовність променевого методу в мілководних морях обмежена частотами. Якщо $H = 300$ м, ми отримуємо $f > 500$ Гц.

Променевий метод не дозволяє розрахувати акустичне поле в зоні тіні (відсутність дифракції) і в точках каустики (точках перетину променів, випущених під близькими кутами).

При необхідності розрахунку параметрів акустичного поля в даній точці необхідно виконати повне трасування акустичних променів по всій вертикальній площині, що з'єднує джерело випромінювання і приймач.

Переваги методу нормальних мод

Метод нормальних мод дозволяє відносно легко визначити властивості акустичного поля на великих відстанях від джерела. Розрахунок поля поблизу випромінювача складний через необхідність узагальнення властивостей значної кількості власних хвиль хвилеводу, в тому числі, в першу чергу, «реактивних мод».

Метод нормальних мод дозволяє визначати параметри акустичного поля безпосередньо в місці розташування приймального перетворювача без необхідності розрахунку акустичного поля на всьому шляху поширення.

Обмеження методу нормальних мод

Недоліком методу нормальних мод є вимога щодо однакового профілю швидкості звуку та однакової глибини по всій акваторії аналізу.

Як і в будь-якому хвильовому методі аналізу акустичного поля, у методі нормальних мод існують певні проблеми з достатнім врахуванням граничних умов. При визначенні характеристик нормальних хвиль вирішується крайова задача, а імпедансною межею вважається морське дно, що ускладнює комплексний врахування властивостей морського дна як специфічного акустичного відбивача з втратами [46].

Метод нормальних мод не дозволяє врахувати наявність перешкод на шляху поширення акустичних хвиль.

Переваги методу параболічного рівняння

Параболічні хвильові рівняння чудово пристосовані для ефективних машинних розрахунків. Останнє пов'язано головним чином з тим, що вони відносяться до «еволюційного» класу диференціальних рівнянь у похідних приватних, і можна легко побудувати алгоритми, в яких акустичне поле за один цикл розрахунків просувається на один крок по відстані, для чого використовується інформація про поле тільки на раніше обчислених дистанціях. Крім того, при цьому шукається загальна, що сама повільно змінюється, і тому обчислення не потрібно проводити на інтервалах порядку довжини хвилі [47].

Це уможливило чисельне вирішення завдання підводного поширення звуку на ЕОМ 70 років 20 століття, що було б немислимо при безпосередньому розв'язанні еліптичного рівняння Гельмгольца або гіперболічного акустичного хвильового рівняння. Тому основною причиною, що стимулювала розвиток методів параболічного наближення, було бажання зробити на початку аналізу контрольовані надійні наближення, щоб отримати наближені рівняння, які хоча і не вирішуються аналітично, проте особливо добре пристосовані для обчислень.

Метод параболічного рівняння виключно добре підходить для аналізу поширення низькочастотного звуку на великі відстані в глибокому океані, особливо якщо середовище сильно змінюється з відстанню, коли інші методи трапляються зі значними труднощами.

Метод параболічного рівняння придатний аналізу широкого класу джерел (типу спрямованих випромінювачів тощо.).

Обмеження методу параболічного рівняння

В силу прийнятих припущень застосування методу параболічного рівняння обмежено умовами підводного звукового каналу в глибокому морі.

Переваги методу програми швидкого поля:

Даний метод не поділяє поле на нормальні хвилі, а вважає його повністю, включаючи і неоднорідні хвилі, тому ПШП до деякої відстані r_{\max} вважає поле дуже точно і може бути еталоном для інших методів. Однак зі збільшенням відстані понад r_{\max} розрахунок поля стає помилковим через періодичність Фур'є-образу. Тому вибір кроку $\Delta\xi$ виконується відповідно до теорем про дискретизації. Метод ПШП дозволяє визначати параметри акустичного поля у точці розташування приймального перетворювача без необхідності розрахунку акустичного поля по всій трасі поширення [48].

Обмеження методу програми швидкого поля:

Недоліком методу є вимога однакового профілю швидкості звуку та однакової глибини по всій акваторії проведення аналізу. Як і будь-якому хвильовому методі аналізу акустичного поля, у ПШП існують проблеми адекватного обліку граничних умов. При визначенні поля вирішується крайове завдання, у своїй дно моря сприймається як імпедансна кордон, що утрудняє всебічний облік показників морського дна як специфічного акустичного відбивача з втратами. ПШП не дозволяє враховувати перешкод на трасі поширення акустичних хвиль.

Переваги та недоліки числових моделей

Численні моделі на основі МКР або МКЕ придатні для аналізу акустичних полів у морі в будь-яких умовах, за яких залишаються справедливими прийняті як базові хвильове рівняння та рівняння Гельмгольца. Точність розрахунків обмежується точністю завдання акустичних параметрів тривимірного середовища.

Недоліком моделей може вважатися складність програмної реалізації та високі вимоги до пам'яті та швидкодії ЕОМ.

Незважаючи на те, що методи на основі променя часто більш ефективні для поширення високочастотного сигналу на великі відстані, FDM пропонує більш комплексний підхід, який може краще обробляти низькі частоти та складні взаємодії. Це дозволяє моделювати явища, такі як багаторазове відображення та заломлення, які важливі для розуміння поведінки сонара[50].

1.2. Дослідження існуючих систем моделювання гідроакустичних сигналів

WaveQ3D, або Wavefront Queue 3D, — це бібліотека підводного моделювання (USML), розроблена для розрахунку втрат передачі звуку в морському середовищі. Ця модель використовує гібридні промені Гауса в сферичних і часових координатах, що покращує її здатність ефективно імітувати підводну акустику. WaveQ3D використовує метод формування променя Гауса, який значно покращує швидкість і точність обчислень, особливо в акустичних сценаріях, що швидко розвиваються [51]. Цей метод забезпечує ефективні результати розповсюдження на сферичній Землі, що робить його придатним для складних підводних середовищ [52].

Модель є частиною поточної дослідницької ініціативи, спрямованої на створення швидких і точних власних променів акустичних втрат передачі. Ця здатність має важливе значення для додатків у моделюванні та симуляції сонара, особливо в прибережних середовищах (прибережних)[53].

WaveQ3D є відкритим програмним забезпеченням та заохочує співпрацю і вдосконалення моделі через репозиторій Git, доступний на GitHub.

WaveQ3D в основному використовується в таких сферах, як дослідження океанічних та морських середовищ, наприклад моделювання сонарних систем і розуміння поведінки підводного звуку; або для моніторингу водного середовища для оцінки впливу звуку на морські системи, дослідження пересування популяцій підводного життя; а також для військового застосування у морських операціях, де акустичне виявлення є критичним.

Оскільки WaveQ3D використовує променеву теорію для моделювання звукових променів у середовищах з поступовими градієнтами температури та інших

характеристик, це програмне забезпечення ідеальне для однорідних або майже однорідних середовищ з плавними змінами, наприклад, в водних середовищах з поступовими градієнтами температури або тиску [52]. Однак, цей метод менш точний у середовищах з різкими змінами властивостей, такими як раптові зміни глибини або неоднорідні структури, оскільки променева теорія не враховує дифракційні ефекти на низьких частотах.

WaveQ3D використовується переважно для моделювання вищих частот, особливо для частот понад 1000 Гц, що робить його ідеальним для завдань, пов'язаних із високочастотним сонаром та іншими акустичними системами, які використовують короткі хвилі. У випадку з низькими частотами, точність цього методу знижується через обмеження променевої теорії, яка недостатньо добре описує дифракцію звуку на довших хвилях.

WaveQ3D має відносно низьку обчислювальну складність, оскільки променева теорія вимагає розрахунку лише траєкторій окремих променів. Це дозволяє швидко отримати результати для середовищ з поступовими градієнтами характеристик та високими частотами (понад 1000 Гц)[53]. Однак точність розрахунків може знижуватися в складних середовищах, де потрібно враховувати дифракцію і неоднорідності, що знижує ефективність цього методу.

WaveQ3D забезпечує високу точність для моделювання звукових полів на високих частотах (понад 1000 Гц), де звукові хвилі можуть моделюватися у вигляді променів. Для однорідних або майже однорідних середовищ із поступовими змінами властивостей WaveQ3D забезпечує хорошу точність. Однак при роботі на низьких частотах або в середовищах із сильними неоднорідностями точність значно знижується, оскільки променева теорія не враховує хвильові ефекти, такі як дифракція.

WaveQ3D є спеціалізованим інструментом для моделювання акустичних променів, який доповнює більш повільні моделі, такі як параболічне рівняння та нормальні моди. Доступність цього інструменту дещо обмежена, оскільки він найчастіше використовується в академічних або науково-дослідних колах. Підтримка залежить від документації, доступної у вигляді наукових публікацій та технічних

звітів, що робить його менш доступним для широкої аудиторії. Для користувачів без великого досвіду у сфері акустичного моделювання підтримка може бути складнішою.

На основі наведеного вище опису, можна виділити наступні особливості програмного забезпечення:

- Найкраще працює в однорідних середовищах або в умовах з поступовими змінами характеристик. Погано підходить для середовищ з різкими змінами або складними неоднорідностями.
- Низька обчислювальна складність. Швидкий метод, але обмежений для простих середовищ.
- Висока точність для високих частот (>1000 Гц) в однорідних середовищах. Менш точний для низьких частот і складних середовищ.

KRAKEN — це складний програмний інструмент, який використовується для підводного акустичного моделювання, особливо ефективний у моделюванні поширення звуку в різних океанських середовищах. Він є частиною Бібліотеки океанської акустики та призначений для обробки складних сценаріїв, що включають як умови, що залежать від діапазону, так і залежні від діапазону.

KRAKEN використовує теорію нормальних мод для моделювання поширення звуку, що робить його придатним для аналізу підводної акустики в різноманітних умовах, включаючи мілководдя та глибоководдя [54].

Дане програмне забезпечення дозволяє моделювати повністю тривимірне океанське середовище, розширюючи його можливості для моделювання реалістичних підводних акустичних сценаріїв. Це включає варіанти представлення складної батиметрії та різноманітних умов навколишнього середовища.

Також, програмне забезпечення має зручний інтерфейс, який полегшує налаштування акустичних моделей, що робить його доступним для дослідників і практиків у морській акустиці.

Розширена генерація сіток: програмне забезпечення може генерувати неструктуровані сітки, призначені для акустичного моделювання, що є важливим для точного представлення підводного середовища та підвищення точності моделювання.

KRAKEN широко використовується в різних сферах, зокрема у військово-морських дослідженнях для моделювання поширення звуку, для виявлення різноманітних надводних та підводних об'єктів, орієнтування на місцевості, тощо[55]; у цілях екологічного моніторингу для оцінки впливу шуму на морське життя та екосистеми; та в різноманітних енергетичних проектах, при оцінці акустичного середовища навколо морських вітрових електростанцій та інших морських споруд [56].

Таким чином, KRAKEN є життєво важливим інструментом для дослідників та інженерів, які працюють у підводній акустиці, пропонуючи розширені можливості для моделювання складних акустичних середовищ. Його універсальність робить його застосовним у багатьох областях, від військових застосувань до екологічних досліджень.

KRAKEN є універсальним інструментом, який охоплює широкий частотний діапазон, від низьких до високих частот. Він може використовуватися як для низькочастотного моделювання в глибоководних середовищах, так і для вищих частот у мілководних умовах. Завдяки врахуванню всіх можливих нормальних мод, він забезпечує високу точність у всьому частотному спектрі, що робить його ефективним для досліджень морських акустичних полів різної складності.

KRAKEN підходить для багатошарових середовищ з чіткими границями між шарами, де важливо враховувати різні нормальні моди поширення звуку. Він добре працює у глибоководних умовах, шельфових зонах, а також у середовищах, що можуть змінюватися по відстані або глибині. Цей метод особливо ефективний у середовищах з вертикальною стратифікацією води, таких як океани з багатошаровими профілями температури або солоності. Його можна використовувати як у стабільних середовищах, так і в умовах з поступовими змінами.

KRAKEN має помірну обчислювальну складність. Він потребує обчислення всіх нормальних мод у середовищі, що може бути досить складним завданням, особливо у багатошарових і неоднорідних середовищах. Незважаючи на це, KRAKEN є ефективним для багатьох задач у моделюванні, особливо для вертикально

стратифікованих середовищ і відстаней, що залежать від діапазону, хоча розрахунки можуть потребувати більше часу на великих відстанях або в складних середовищах.

Зокрема данне програмне забезпечення є одним із найточніших інструментів для моделювання звукових полів, особливо в багатошарових середовищах і на великих відстанях. Завдяки використанню методу нормальних моди у моделюванні поширення звукових хвиль, програмне забезпечення дозволяє отримати дуже точні результати як на низьких, так і на високих частотах. KRAKEN підходить для середовищ із вертикальною стратифікацією, таких як океани з різними шарами води, і забезпечує точність навіть у складних умовах.

Оскільки KRAKEN є одним із найвідоміших інструментів для моделювання гідроакустичного поля за допомогою нормальних мод, він широко використовується в академічних колах, і його документація добре доступна, включаючи технічні посібники та приклади. Підтримка спільноти є сильною завдяки тривалому використанню цього інструменту у сфері морської акустики. Існують численні наукові роботи, в яких KRAKEN розглядається та використовується, що полегшує його інтеграцію в нові дослідження. Підтримка для нових користувачів також добре забезпечена через існуючі ресурси.

Підсумовуючи, KRAKEN підтримує широкий частотний спектр і ефективний для різних середовищ як на низьких, так і на високих частотах; добре підходить для багатошарових та стратифікованих середовищ з чіткими границями між шарами. Ефективний у стабільних і змінних середовищах, особливо у вертикально стратифікованих водах; має помірну складність, яка зростає з кількістю шарів та відстанями.

Параболічне рівняння Монтерея-Маямі (ММРЕ) — це повнохвильова модель підводного акустичного розповсюдження, яка використовує дробовий маршовий алгоритм Фур'є. Ця модель особливо ефективна для імітації поширення звуку в складних підводних середовищах, що робить її цінним інструментом для різних застосувань у морській акустиці.

На відміну від моделей трасування променів, ММРЕ використовує повнохвильове наближення, щоб можна було точно імітувати акустичне поширення в

середовищах, де звукові хвилі взаємодіють із різними умовами, такими як градієнти температури та солоності.

Метод Фур'є з розділеним кроком: у моделі використовується метод Фур'є з розділеним кроком, який дозволяє ефективно обчислювати звукові поля на великих відстанях. Цей метод особливо корисний у сценаріях, що залежать від дальності, що часто зустрічається в підводній акустиці [57].

Спочатку реалізація була розроблена на Fortran, але згодом модель MMPE була переписана на Java, що призвело до більш зручного інтерфейсу під назвою WinMMPE[58]. Ця версія об'єднує моделювання, постобробку та графічний вихід, покращуючи зручність для дослідників і практиків.

Дане програмне забезпечення часто порівнюють з такими як Bellhop. Bellhop: ефективна модель трасування променів для глибшої води з простішою геометрією. Це може не працювати так добре в дрібних або складних середовищах, де коливання глибини значно впливають на поширення звуку. В той час MMPE більше підходить для мілководних середовищ і низькочастотних звуків завдяки своїй здатності справлятися зі складними взаємодіями та факторами навколишнього середовища.

Таким чином, модель параболічного рівняння Монтерея-Маямі є потужним інструментом для підводного акустичного моделювання, особливо корисним у сценаріях мілководдя та складних середовищах. Перехід до впровадження на основі Java покращує доступність і зручність використання як для дослідників, так і для практиків.

1.3. Постановка завдання дослідження та часткових завдань дисертації

Метою дисертаційного дослідження є підвищення точності та швидкості обрахунків при моделюванні розповсюдження звукових променів гідроакустичного поля морської акваторії за допомогою методу нормальних мод. Це дослідження спрямоване на розробку алгоритмів і програмних засобів, що дозволять врахувати складні умови морського середовища, такі як багат шаровість водної маси,

температурні градієнти, неоднорідність морського дна та вплив відбиття і заломлення звукових хвиль.

З огляду на описаний аналіз існуючих досліджень та програмного забезпечення, можна поставити такі часткові наукові завдання:

1. Аналіз існуючих методів моделювання гідроакустичного поля: дослідження актуальних підходів до моделювання звукових хвиль у морських середовищах (метод нормальних мод, променевий метод, параболічне рівняння, метод інтеграції за хвильовим числом та інші); визначення переваг і недоліків кожного методу для різних типів середовищ та частотних діапазонів.

2. Вибір методу для підвищення точності моделювання: обґрунтування вибору методу нормальних мод для моделювання розповсюдження звукових хвиль у морських акваторіях; розроблення стратегії підвищення точності моделювання для різних умов морського середовища.

3. Розроблення алгоритмів для моделювання гідроакустичного поля: створення алгоритмів на основі методу нормальних мод, що враховують складну багат шарову структуру морського середовища та відбиття звукових хвиль від морського дна і поверхні води; оптимізація обчислювальної складності алгоритмів для можливості їхнього використання в реальних умовах з обмеженими ресурсами.

4. Розроблення програмних засобів для моделювання: розроблення програмного комплексу для моделювання розповсюдження звукових хвиль у морській акваторії, який буде базуватися на розроблених алгоритмах; тестування програмного забезпечення на моделях з різними умовами середовища.

5. Експериментальна перевірка результатів: проведення моделювання для кількох різних сценаріїв морських акваторій (з різними температурами, глибинами та характеристиками дна); порівняння результатів моделювання з існуючими даними і результатами, отриманими іншими методами (наприклад, променевий метод або параболічне рівняння).

6. Висновки та рекомендації: аналіз отриманих результатів і визначення умов, за яких метод нормальних мод демонструє максимальну точність; вироблення

рекомендацій щодо подальшого використання та вдосконалення методів моделювання гідроакустичних полів у морських акваторіях.

Ці часткові завдання спрямовані на досягнення загальної мети дослідження та вдосконалення процесу моделювання гідроакустичних полів у морському середовищі, що має практичне застосування в акустичних дослідженнях океану, навігації та моніторингу морських екосистем.

Метод нормальних мод було обрано для доопрацювання у моєму дослідженні через кілька важливих причин, які роблять його одним із найефективніших підходів для моделювання гідроакустичного поля морської акваторії. Ось основні аргументи, чому саме цей метод кращий за інші та чому він добре підходить до теми дипломної роботи:

1. Універсальність для різних частот. Метод нормальних мод є дуже ефективним для роботи з широким спектром частот, від низьких до високих. Це важливо, оскільки гідроакустичні поля морських акваторій часто містять хвилі різних частот, і здатність методу адекватно моделювати всі частотні діапазони є великою перевагою. Інші методи, такі як променевий метод (Rays), працюють добре лише на високих частотах і мають обмеження при роботі з низькочастотними хвилями, що обмежує їх застосовність у різних умовах.

2. Точність для багат шарових середовищ. Однією з ключових переваг методу нормальних мод є його здатність точно моделювати звукові поля в середовищах з багат шаровою структурою, такими як морська акваторія, де існують різні температурні шари та зміни в характеристиках води на різних глибинах. Інші методи, наприклад, променевий метод або параболічне рівняння, можуть втрачати точність у таких умовах, оскільки вони не завжди враховують складність багат шарової структури середовища з тією ж точністю.

3. Ефективність на великих відстанях. Метод нормальних мод є дуже ефективним при моделюванні звукових полів на великих відстанях. Це особливо актуально для морських середовищ, де поширення звукових хвиль може відбуватися на сотні кілометрів. Інші методи можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів для

такого типу задач або втрачати точність на великих відстанях через спрощені моделі хвильових процесів.

4. Врахування відбиття і заломлень. Метод нормальних мод дозволяє точно враховувати ефекти відбиття звукових хвиль від поверхні моря та морського дна, що є критичним для гідроакустичних середовищ. Це робить його більш придатним для завдань, пов'язаних із розповсюдженням звукових променів у морському середовищі. В інших методах, наприклад, у параболічному рівнянні або променевій теорії, врахування цих ефектів може бути обмеженим або спрощеним.

5. Специфіка теми дослідження. Мета дослідження полягає у підвищенні точності моделювання розповсюдження звукових променів гідроакустичного поля морської акваторії. Метод нормальних мод є ідеальним для цієї задачі, оскільки він дозволяє отримати дуже точні результати в середовищах із складними характеристиками. Завдяки цьому, можна краще описати поширення звукових хвиль у морській воді, що є важливим для завдань, пов'язаних із акустичним моніторингом морських середовищ, навігацією підводних об'єктів або вивченням поведінки морського дна.

1.4. Висновки до розділу 1

1. Всі розглянуті моделі адекватно описують акустичне поле в морському середовищі у межах своєї застосовності.

2. Точність результатів аналізу визначається відповідністю заданих у моделі акустичних параметрів – вертикального розподілу швидкості звуку, профілю дна та його акустичних характеристик, параметрів реального середовища.

3. Променева модель найбільш придатна для аналізу поширення акустичних хвиль у дрібному морі на високих частотах $f > 400 \dots 500$ Гц на малих дальностях, що не перевищують 3-5 кратну глибину акваторії.

4. Для цих умов, але при використанні низьких частот переважна швидка польова модель.

5. При аналізі поширення акустичних хвиль на велику дальність у дрібному морі з використанням низьких частот, слід віддати перевагу моделі нормальних хвиль.

6. Модель на основі параболічного рівняння застосовується для розрахунків акустичного поля на великій дальності у підводному звуковому каналі глибокого моря.

7. Променева модель допускає аналіз за умов акваторії змінної глибини і може враховувати наявність акустичних перешкод на трасі поширення сигналу.

8. Перелічені вище польові моделі можуть застосовуватись тільки для акваторій постійної глибини.

9. Всі розглянуті моделі не дозволяють повною мірою врахувати нестационарні та хаотичні процеси в морському середовищі: хвилювання поверхні; течії та пов'язані з ними зміни розподілу акустичних параметрів по акваторії.

10. Найбільш універсальними та точними є чисельні моделі розповсюдження акустичних сигналів на основі МКР або МКЕ. Зазначені моделі оперують безпосередньо з хвильовим рівнянням чи рівнянням Гельмгольца для акустичного поля і за їх побудові практично робиться ніяких спрощень. Ці моделі дозволяють аналізувати акустичні поля у тривимірному середовищі практично на будь-яких частотах (аж до ультразвуку) та на будь-яку дальність. Проте практична реалізація цих моделей передбачає створення складних програмних комплексів та високі вимоги до оперативної пам'яті та швидкодії ЕОМ.

11. Найкращим способом розрахунку гідроакустичних полів великих відстанях за умов дрібного моря є метод нормальних мод. При використанні методу нормальних мод слід враховувати зміну постійної гравітаційної на трасі поширення хвилі.

Метод нормальних мод був обраний через його здатність забезпечувати високу точність, універсальність і ефективність для роботи з багат шаровими морськими середовищами на великих відстанях. Він є кращим за інші методи, оскільки дозволяє глибше враховувати складність середовища і забезпечує точні результати, що відповідає меті дослідження.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ В МОРІ

Гідроакустика — це розділ акустики, який вивчає процеси поширення звукових хвиль у водних середовищах, таких як моря, океани, річки та озера. Основна увага приділяється дослідженню звукових явищ у воді, їх взаємодії з підводними об'єктами та іншими середовищами, а також впливу різних факторів на швидкість, напрямок і інтенсивність звуку. Завдяки високій здатності звукових хвиль передаватися на великі відстані у воді, гідроакустика стала важливим інструментом для вивчення морського дна, підводної навігації, рибальства і військових застосувань, зокрема для підводних човнів і сонарів.

Завдяки високій швидкості та великим відстаням поширення звуку, звукові хвилі у воді активно використовуються в різних практичних застосуваннях, зокрема для гідроакустичних систем, таких як сонари. Вони дозволяють вивчати морське дно, визначати глибину водойм, знаходити підводні об'єкти та спостерігати за морським життям. Однак через такі фактори, як рефракція, відбиття та поглинання звуку водою, його поширення у водному середовищі стає складним, тому точне моделювання звукових хвиль є ключовим для ефективного використання гідроакустичних технологій.

Крім того, гідроакустика відіграє важливу роль у дослідженні біоакустики підводних організмів, таких як кити, дельфіни та інші морські тварини. Вивчення звуків, які вони використовують для комунікації, полювання або навігації, дозволяє зрозуміти складну екосистему океану. Водночас зростає важливість дослідження впливу шумового забруднення океану на морських мешканців, оскільки активне використання гідроакустичних технологій може порушувати їх природну поведінку.

2.1. Загальні поняття гідроакустики

Акустичні коливання за своєю природою є механічними коливаннями. Якщо частота цих коливань змінюється від кількох герц до приблизно 16000 Гц, то такі коливання називаються звуковими. Акустичні коливання з частотою вище 20000 Гц

називають ультразвуком. Поширення акустичних коливань стає можливим завдяки наявності пружних зв'язків між частинками середовища. Носієм акустичних коливань може бути тільки пружне середовище.

Найважливішою і основною кількісною характеристикою звукового поля є величина акустичного тиску. У будь-якому морському акустичному експерименті безпосередньо зареєстрована величина також є акустичним тиском.

Тиск - це сила, що діє вздовж нормалі до площі одиниці площі. У Міжнародній системі одиниць (СІ або в російській транскрипції СІ) першими одиницями опису механічних процесів прийняті метр, кілограм (маса) та інші. Одиницею сили в СІ є ньютон (Н) – сила, яка надає масі 1 кг прискорення 1 м/с^2 . Акустичний тиск виражається в паскалях (Па) і є тиском, спричиненим силою 1 Н, рівномірно розподіленою по площі поверхні 1 м^2 [57].

Статичний тиск у сучасній гідроакустиці також виражається в паскалях або кілопаскалях (кПа). Атмосферний тиск приблизно 105 Па.

При зануренні у воду статичний тиск збільшується приблизно на 100 кПа на кожні 10 м глибини. Статичний тиск в океані на глибині близько 5 км становить близько 50 мегапаскалей ($50 \text{ МПа} = 5 \cdot 10^7 \text{ Па}$).

Швидкість, з якою частинка коливається в акустичному полі відносно свого положення рівноваги, називається віброшвидкістю, швидкість передачі коливального стану в середовищі – швидкістю поширення хвилі [58].

В однорідному та ізотропному середовищі акустичні хвилі поширюються прямолінійно з постійною швидкістю незалежно від напрямку поширення. Швидкість звуку в поглинаючому середовищі є комплексною величиною і може бути записана для рідини як $c = \sqrt{k / \rho}$ [59].

Значення ρ у цій формулі є рівноважним значенням густини. Величину c можна вважати приблизно незалежною ні від амплітуди акустичних коливань, ні від їх частоти.

У морській воді середня швидкість звуку зазвичай приймається рівною 1500 м/с в залежності від температури, тиску і т. д. Ця величина може змінюватися на кілька

десятків м/с в ту чи іншу сторону. У породах, що складають морське дно, швидкість поширення поздовжніх хвиль більша, ніж у воді, і збільшується в міру просування до глибших і щільніших шарів дна.

Дійсна частина швидкості поширення поперечної хвилі в твердих тілах можна розрахувати як

$$c' = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.1)$$

де G – дійсна частина модуля зсуву [60].

У каменях і товстому льоду величина c' зазвичай в півтора-два рази менше швидкості поздовжніх хвиль. Поперечні хвилі дуже швидко затухають, оскільки при їх поширенні великі зсувні зміщення, а отже, і втрати на в'язке тертя.

Акустичні коливання можуть бути періодичними і неперіодичні. Для опису акустичних хвиль, як і для опису будь-яких коливальних процесів, використовуються терміни частота, довжина хвилі, спектр тощо [61]. Найбільше застосування в підводній акустиці отримали акустичні коливання, частоти яких знаходяться в діапазоні приблизно від 100 Гц до 30-50 кГц (довжини хвилі у воді відповідно 15 м і 5-3 см). Проте ряд проблем вирішується використанням як височастотних, так і низькочастотних коливальних. Зокрема, дослідження будови дна під морями та океанами проводять сейсмоакустичними методами, які використовують інфразвукові та звукові хвилі з частотою від кількох герц.

Акустична довжина хвилі вираховується за наступною формулою:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Положення коливається частинки по відношенню до положення її рівноваги називається фазою коливання.

Величину $k = 2\pi / \lambda$ називають хвильовим числом.

Поверхня, яка має властивість, що всі розташовані на ній частинки мають однакові фази коливальних, є хвильовою поверхнею. Форма залежить від характеристик джерела коливальних (його конфігурації, типу коливальних і т. д.) і від природи середовища, в якому ці коливання поширюються (неоднорідна, однорідна, безмежна, обмежена

різними перешкодами і т. д.). Геометричне розташування точок, яких коливання досягло за один момент, називається фронтом хвилі і є окремим випадком поверхні хвилі. Напрямки, в яких акустичні коливання поширюються вздовж джерела, називаються акустичними променями. В ізотропному середовищі, яке має однакові властивості в усіх напрямках, ці промені перпендикулярні до хвильових поверхонь [62].

Акустична енергія передається середовищу від джерела звуку, а потім поширюється у вигляді звукової хвилі. Кількість енергії в одиниці об'єму середовища називається густиною звукової енергії. Енергія в середовищі поширюється по звукових променях. Кількість акустичної енергії, яка протікає за одиницю часу через одиницю площі, перпендикулярної до напрямку поширення – щільність потоку звукової енергії – називається інтенсивністю звуку. Ця величина також є дуже поширеною та важливою кількісною властивістю звукового поля.

На великих відстанях від будь-якого джерела акустичні хвилі можна як розходяться з однієї точки. В ізотропному середовищі швидкість звуку однакова в усіх точках, і тому передній фронт акустичної хвилі, хвильовий фронт, є частиною сферичної поверхні (товста пунктирна лінія). Радіус цієї поверхні дорівнюватиме $R = ct$, де t — час, що минув від початку випромінювання [63]. Інші хвильові поверхні також будуть сферичними, тобто. поверхні з однаковою фазою хвилі (тонка пунктирна лінія). Хвиля, що розходить з однієї точки в однорідному середовищі, називається сферичною, незалежно від величини кута розкриття φ . У будь-якому ізотропному середовищі промені і хвильові поверхні взаємно перпендикулярні.

В окремому випадку, коли розміри випромінювача малі порівняно з довжиною хвилі акустичних коливань, акустичне поле випромінюється рівномірно в усіх напрямках [64]. Таке джерело звуку називається всенаправленим. Хвильовий фронт і хвильові фронти в полі такого джерела є повними сферами.

При теоретичному розгляді проблем акустики широко використовується поняття плоскої хвилі. Промені плоскої хвилі завжди йдуть паралельно, її хвильові поверхні є плоскими, перпендикулярними до променів [65]. У реальних ситуаціях хвиля ніколи

не буває плоскою; хоч і на великій відстані від джерела завжди можна виділити невелику ділянку, на якому можна приблизно вважати хвилю плоскою

У загальному випадку повинні виконуватися такі умови:

- 1) довжина ділянки DR вздовж напрямку поширення хвилі повинна бути набагато меншою за відстань R від джерела;
- 2) кут, під яким видно цю ділянку з точки випромінювання, має бути малий;
- 3) якщо замінити сферичні хвильові поверхні, що обмежують цю ділянку, плоскими, то різниця набігу фаз з будь-яких променів повинна залишатися набагато менше 2π .

Щільність потоку енергії в плоскій хвилі однакова по всьому простору, де поширюється ця хвиля, якщо середовище однорідне і є непоглинаючою [66]. У сферичній хвилі щільність потоку енергії зменшується з відстанню. У середовищі немає додаткових джерел поповнення енергії, і в однорідному середовищі випромінювана потужність розподіляється рівномірно, «розмазується» по всій площі хвильового фронту (або хвильової поверхні). Позначимо W акустичну потужність, створювану ненаправленим випромінювачем. В однорідному непоглинаючому середовищі на будь-якій відстані R від ненаправленого джерела інтенсивність звуку [60]:

$$I = \frac{W}{4\pi R^2} \quad (2.3)$$

де $4\pi R^2$ — площа перпендикулярної променям хвильової поверхні, що проходить на відстані R від випромінювача. Величина I часто називається силою звуку. Якщо джерело направлено і випромінювана ним потужність зосереджена в межах тілесного кута Q , формула, що визначає середню величину інтенсивності звуку в межах цього кута на відстані R має вигляд [64]:

$$I_{cp} = \frac{W}{\Omega R^2} \quad (2.4)$$

Інтенсивність звуку виявляється у одиницях потужності, віднесених до площі — $Вт / м^2$ (СІ).

Тиск в акустичній хвилі однозначно пов'язаний із щільністю потоку звукової енергії у цій самій точці середовища. При синусоїдальній плоскій хвилі цей зв'язок виражається співвідношенням [63]:

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c} = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} \quad (2.5)$$

де p_0 - амплітудне,

$p_{ef} = 0,7 p_0$ - ефективне значення тиску,

ρ -щільність середовища,

c -швидкість звуку в середовищі.

Співвідношення може бути використане і при сферичній хвилі, якщо ділянка хвильової поверхні одиничної площі, за яким розраховується сила звуку, можна вважати плоским.

Рівняння $Z = \rho c$, відіграє дуже важливу роль теорії поширення звукових хвиль і за електромеханічною аналогією називається акустичним опором середовища [65]. Формула дозволяє за величиною звукового тиску, визначеної, наприклад, в експерименті знайти інтенсивність звуку в тій же точці середовища; та потужність джерела, що створює звукове поле у середовищі.

Теоретичні рішення, отримані припущенні, що акустична хвиля плоска, можуть бути використані для оцінки реальних ситуацій, якщо виконуються перелічені вище умови. Необхідна жорсткість виконання цих умов залежить від поставленого завдання; у багатьох випадках третя вимога взагалі не є суттєвою [67].

У товщі вод й у породах дна океану швидкість звуку залишиться незмінною, оскільки змінюються і щільність середовища, та її пружні властивості. Внаслідок цього характер поширення акустичних хвиль виявляється значно складнішим, ніж у однорідних середовищах.

Швидкість звуку в океані істотно залежить від глибини, і це призводить до викривлення звукових променів у вертикальній площині, до рефракції акустичного поля. Складна стратифікованість, характерна для океанічного середовища, — поверхня, товща води, шари дна з різними акустичними властивостями — призводить

до виникнення відбитих і заломлених хвиль на кордонах з різкою зміною швидкості звуку [61].

Крім того, поверхня океану та його дно не є ідеальними плоскими межами розділу. На поверхні є хвилі, на дні — хребти, пагорби та багато дрібних нерівностей (залізомарганцеві конкреції, знаки брижів, сліди життєдіяльності організмів тощо). Всі ці нерівності можуть суттєво спотворювати звукові поля - порушувати фазові співвідношення, розсіювати частину енергії за іншими напрямками та ін. Аналогічним чином діють і акустичні неоднорідності, укладені у товщі води та дна.

Всі ці особливості роблять дуже важким завдання розрахунку акустичного поля далеко від джерела. Найбільш точне та надійне рішення може бути отримане методами хвильової акустики. Ці методи базуються на використанні фундаментальних рівнянь гідродинаміки, теорії пружності та ін. Однак хвильові розрахунки майже завжди вимагають використання складного математичного апарату, у ряді випадків дуже громіздкого і дає результати, що важко аналізуються. Крім того, недостатність відомостей про справжні характеристики середовища часто зводить нанівець переваги суворих математичних методів [67].

Для великого кола завдань практичної гідроакустики використовують спрощені методи розрахунку. Найважливішим є метод променевої акустики, аналогічний методам геометричної оптики. Як правило, він дозволяє отримати правильну картину явища у всіх випадках, коли розміри неоднорідностей набагато більше довжини хвилі, і коли на довжині акустичної хвилі не відбувається помітних змін характеристик середовища (швидкості звуку, щільності тощо).

У ряді випадків для оцінки впливу середовища на акустичне поле зручно користуватися феноменологічним підходом, не торкаючись фізичної природи явища [66]. Зазвичай широко використовуються такі поняття, як коефіцієнти розсіювання та відображення, коефіцієнт поглинання та ін., величини яких визначаються дослідним шляхом, а не в результаті розгляду теорії явища, найчастіше поки що відсутньої.

2.2. Вплив змінних середовища на розповсюдження гідроакустичних сигналів в морі

Коефіцієнти відображення та передачі тиску. Акустичні опори середовищ з обох боків від кордону визначають ступінь відображення чи проходження через кордон. Такі властивості важливі при проектуванні датчиків, визначенні характеристик морського дна, акустичних властивостей відкладень, гідролокаційному моделюванні та оцінці мети сили.

Коефіцієнти відображення та передачі тиску на кордоні визначаються виразами[68]:

$$\begin{aligned} R_{12} &= \frac{\rho_3}{\rho_1} = \frac{A - B}{A + B} \\ T_{12} &= \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{2A}{A + B} \end{aligned} \quad (2.6)$$

де $A = \theta_2 \cos \theta_2$,

$B = \sigma_1 \cos \theta_1$, $\sigma_1 = \rho_1 c_1$.

Розглянемо різні випадки для коефіцієнтів відображення та передачі тиску залежно від σ_1 та σ_2 [69]:

– якщо $\sigma_2 \ll \sigma_1$, то $R_{12} = -1$ та $T_{12} = 0$: звукова хвиля падає на поверхню моря σ_2 стає акустичним опором повітря, а σ_1 – води, при цьому поверхня моря називається «засобом для скидання тиску» і для відбитої хвилі відбувається інверсія фази;

– якщо $\sigma_2 \gg \sigma_1$, то $R_{12} = 1$ і $T_{12} = 0$: звукова хвиля падає на жорстке морське дно, у своїй інверсія фази при відбитку немає;

– якщо $\sigma_2 = \sigma_1$, то $R_{12} = 0$ та $T_{12} = 1$: звукова хвиля падає на мембрану, яка використовується для захисту підводних перетворювачів, при цьому передача є повною та звук не відображається.

Оскільки відбита хвиля залишається в межах середовища 1, коефіцієнт відображення інтенсивності є квадратом R_{12} і буде заданий як

$$\mu_r = \frac{I_3}{I_1} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{(\sigma_2 + \sigma_1)^2} \quad (2.7)$$

Разом з тим, оскільки сума відбитих і потужностей, що передаються, повинна дорівнювати потужності падаючої хвилі, то коефіцієнт передачі можна обчислити таким чином [70]:

$$\mu_t = \frac{I_2}{I_1} = 1 - \mu_r = \frac{4\sigma_2\sigma_1}{(\sigma_2 + \sigma_1)^2} \quad (2.8)$$

Слід зазначити, що з випадку $\sigma_1 = \sigma_2$ потік потужності є повним. Таким чином, у процесі поглинання та відображення гідроакустичної хвилі зсув фази не відбувається.

Якщо кут падіння дорівнює критичному куту, то $\theta_1 = 90^\circ$, отже, $T_{12} = 0$. Вираз залишається вірним також для кутів більших, ніж критичний, тому що відбувається повне внутрішнє відображення та відсутня передача [71].

Відображення та передача з різною частотою. Якщо кути падіння хвилі менше критичного кута, то сумарного внутрішнього відбиття немає. У цьому випадку будуть присутні і поглинання, і відображення гідроакустичної хвилі. Коефіцієнти відображення та передачі будуть змінюватися зі зміною кута падіння. Це впливає з виразу [72]:

$$B = \sigma_1 \sqrt{1 - \left(\frac{c_2}{c_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_1}, \theta_1 < \theta_c \quad (2.9)$$

Таким чином, у процесі поглинання та відображення гідроакустичної хвилі зсув фази не відбувається.

Якщо кут падіння дорівнює критичному куту, то $\theta_1 = 90^\circ$, отже, $T_{12} = 0$ [73]. Вираз залишається вірним також для кутів більших, ніж критичний, тому що відбувається повне внутрішнє відображення та відсутня передача.

Слід також зазначити, що для випадку $\sigma_2 \gg \sigma_1$ та $\rho_1 \gg \rho_2$, вираз для φ скорочується до $\operatorname{tg}(\varphi_2) \rightarrow \infty$ або $\varphi = 180^\circ$. Це означає, що незалежно від кута падіння хвиля, відбита від поверхні, завжди матиме інверсію фази [74].

Оскільки поглинання пропорційно до частоти, коефіцієнт ν_2 при $\beta h_2 \gg 1$ досягатиме значень k_{12} для високих частот. При взаємодії акустичних сигналів із реальним дном моря практично ніколи не відбувається дзеркального відбиття. У перевипромінюваному сигналами дні є когерентна і випадкова складові. Когерентна складова формується плоскою поверхнею та її напрямом близький до дзеркального. Випадкову складову формують нерівності дна та неоднорідності ґрунту, її напрями у верхній півсфері випадкові [75].

Відображення та передача: «швидке дно». Багато реальних умов процесу обліку впливу морського дна на поширення гідроакустичної хвилі можуть бути представлені так званим «швидким дном», де швидкість звуку та щільність значно перевищують такі ж характеристики шарів води, що розташовані вище.

Слід зазначити, що дно з осадовими відкладеннями має високу швидкість звуку 1800 м/с. При цьому більш високі значення щільності слабо корелюються з грубішим піском. При цьому критичний кут падіння хвилі не змінюється, перебуваючи в залежності лише від співвідношення швидкостей звуку в двох середовищах. Для кутів, які перевищують критичний, відбувається повне відображення, а для кутів, які менші за критичний, звук переходить в осад. Найбільша передача акустичної енергії відбувається за нормального падіння, коли $\theta_1 = 0$.

Відображення та передача: «повільне дно». За деяких умов, коли щільність відкладень перевищує щільність морської води, що лежать вище, швидкість звуку може бути ще меншою. Цей стан називається "повільним дном". Під кутом θ_1 може відбуватися ідеальне проникнення осад. При цьому коефіцієнт відображення буде нульовим [76]:

$$\theta_1 = \frac{1}{\sin \left(\frac{(\sigma_2^2 - \sigma_1^2)}{c_2^2} (\rho_2^2 - \rho_1^2) \right)^{1/2}} \quad (2.10)$$

Таким чином, при дослідженні процесу розподілу гідроакустичної хвилі в морському середовищі важливим фактором, який слід враховувати, є взаємодія між акустичними хвилями та дном [77]. Цей процес передбачає враховувати кілька

складових: відбиття та поглинання тиску від кордону дбала вода-грунт; розсіювання потужності сигналу від нерівної межі та неоднорідностей у ґрунті; поглинання гідроакустичного сигналу дном моря, облік властивостей ґрунту, розміри та пористість твердих частинок на дні, облік об'ємних, шарових та граничних ревербераційних сигналів та інших факторів.

2.3. Граничні умови при моделюванні гідроакустичних сигналів в морі

Якщо поле звуковий хвилі перебуває деяке тіло, то визначення цього поля потрібно задати граничні умови лежить на поверхні тіла. Звичайно, завдання граничних умов є завданням складнішим, ніж побудова моделі середовища. Адже саме за допомогою характеристик середовища p і v потрібно описати поведінку межі тіла, а це не вдається зробити досить точно. Наведемо декілька моделей граничних умов, що використовуються в акустиці для опису реальних об'єктів.

Моделі акустично твердої межі відповідає ситуації, коли поверхня кордону S не деформується, тобто. нерухома у полі звукової хвилі. Тим не менш, це не означає, що коливальна швидкість частинок середовища, що знаходяться поблизу кордону, дорівнює нулю. Адже згідно з побудованою моделлю акустичного середовища неможливо зафіксувати дотичне зміщення (середовище не пручається зсуву). Звідси умова на кордоні полягає в тому, що нулю дорівнює нормальна, до поверхні S , що становить оп швидкості частинок середовища, що знаходяться біля межі тіла S :

Реальна побудова такої межі можлива з достатньою точністю лише для газів: у нормальних умовах досить велике тверде тіло або поверхня рідини для звукових хвиль у газі майже завжди можна вважати абсолютно жорсткими. Для рідини або твердих тіл побудувати абсолютно жорстку межу досить складно, але в ряді випадків таке наближення є можливим і для цих середовищ [69].

$$v_n|_S = 0 \quad (2.11)$$

Якщо розглядається завдання випромінювання звуку поверхнею S , то умова $v_n|_S = v(r, t)$ визначає рівність нормальної складової швидкості частинок середовища

$v_n|_S$, які розміщені поблизу поверхні S , та швидкості частинок поверхні S , яка описується функцією $v(r, t)$, тобто. у процесі руху поверхня S не деформується під впливом середовища.

Модель акустично м'якої границі — це поверхня S , яка здатна чинити опір тиску, тобто. поверхня S повторює рух частинок середовища, розміщених поблизу неї. Звідси гранична умова полягає в рівності нулю тиску на поверхні:

$$p|_S = 0 \quad (2.12)$$

Ця гранична умова виконується на межі рідини або твердого тіла із вакуумом. З достатньою точністю абсолютно м'яка межа моделює випадок падіння звукової хвилі, яка поширюється у воді, на межу розділу вода – повітря.

Модель межі сполучення двох ідеальних рідин [73]. Тут задають дві умови:

1. кінематична умова, яка свідчить про те, як рухаються частки двох середовищ, що розташовуються поблизу кордону (ця умова відображає принцип безперервності середовища);
2. силова умова - це, по суті, є вимога до виконання третього закону Ньютона.

Оскільки ідеально стисливі рідини не чинять опір зрушенню, то кінематичне умова полягатиме у рівності нормальних складових швидкостей частинок першої та другої середовищ, що розташовуються поблизу кордону, тобто [70]:

$$v_n^{(1)}|_S = v_n^{(2)}|_S \quad (2.13)$$

Силовa умова полягає в рівності тиску, які надають частки першої та другої середовищ одна на іншу вздовж кордону S :

$$p^{(1)}|_S = p^{(2)}|_S \quad (2.14)$$

Завдання випромінювання формулюється наступним способом. На деякій поверхні S задана нормальна складова коливальної швидкості:

$$v|_S = -\frac{\partial \Phi}{\partial n}|_S = f(S) \quad (2.15)$$

де Φ - нормаль до поверхні [71].

Потрібно визначити звукове поле у просторі. Іноді на поверхні визначається не коливальна швидкість, а звуковий тиск (або потенціал) $\Phi|_S = f(S)$.

Може бути також задана комбінація [76]:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} + \sigma \Phi \right) \Big|_S = f(S) \quad (2.16)$$

Завдання визначення поля за заданим потенціалом (звуковим тиском) $\Phi_S = f(S)$ називається завданням Дирихле або першим крайовим завданням. Визначення поля заданої коливальної швидкості $v_S = f(S)$ називається завданням Неймана чи другим крайовим завданням.

Якщо задана комбінація (2.3.6) причому коефіцієнт σ на всій поверхні S є постійною величиною, то таке завдання називається змішаним або третім крайовим завданням. У окремих випадках $\sigma \rightarrow \infty$ і $\sigma \rightarrow 0$ із змішаної задачі випливають завдання Дирихле і Неймана [78].

Якщо σ залежить від розташування точки на поверхні S , то таке завдання називається четвертим крайовим завданням. Іноді її, як і третю, називають змішаною. Найпростішим прикладом четвертої крайової задачі є визначення звукового поля, що випромінюється поршнем, що рухається із заданою коливальною швидкістю, що розташований в акустично м'якому екрані з граничною умовою $\Phi|_S = 0$.

Крім умов на кордоні, для визначення поля необхідно також використовувати умову випромінювання, яка полягає в тому, що з усіх можливих рішень слід вибирати такі функції, які при видаленні точки спостереження від випромінюючого тіла давали б спадання поля за певним законом [78].

Завдання дифракції формулюється в такий спосіб. На тіло, обмежене поверхнею S падає хвиля Φ_0 . В результаті розсіювання виникає нове поле Φ , яке можна уявити у вигляді $\Phi = \Phi_0 + \Phi_S$ $\Phi = \Phi_0 + \Phi_S$, причому різниця між новим полем і початковим називається розсіяною хвилею Φ_S . Потрібно визначити Φ_S таким чином, щоб повне поле Φ на поверхні S задовольняло одній з наступних граничних умов [77]:

Величина імпедансу поверхні Z визначається ставленням звукового тиску до нормальної складової коливальної швидкості (зі зворотним знаком):

$$Z = -\frac{P}{v_n} \quad (2.17)$$

Вибір знака обумовлений такою обставиною. Якщо нормаль до поверхні S спрямована назовні, позитивне значення коливальної швидкості v_n також направлено у зовнішню область [74]. У той же час ясно, що при позитивному звуковому тиску у поверхні S (стисненні) поверхня прагнуче прогнуту у внутрішню область і коливальна швидкість буде негативною. Для усунення цієї суперечності у формулі запроваджено знак мінус. Якщо нормаль до поверхні направлена у внутрішню область, то у формулі повинен бути взятий знак плюс.

$$Z = \frac{i\omega\rho}{\sigma} \quad (2.18)$$

Виразивши потенціал через звуковий тиск та коливальну швидкість, отримаємо співвідношення між i Z ;

Крім зазначених чотирьох завдань існує ще великий клас проблем, котрим граничні умови є складнішими і залежать як від першої похідної потенціалу, а й від похідних вищих порядків. У випадку такі граничні умови можна записати як $L\Phi = 0$, де L — диференціальний оператор, визначальний властивості поверхні. У окремих випадках при $L\Phi = \Phi, L = \frac{\partial}{\partial n}, L = \frac{\partial}{\partial n} + \sigma$ виходять записані вище граничні умови.

Операторні граничні умови з похідними високих порядків зустрічаються при аналізі випромінювання та дифракції звуку пружними поверхнями [76].

Реальні поверхні є пружними, тому зазначені вище граничні умови мають розглядатися як співвідношення, які лише приблизно характеризують властивості поверхні.

На відміну від завдання випромінювання, завдання дифракції умові випромінювання має задовольняти не повне поле Φ , а лише розсіяна частина повного поля Φ_s [78].

2.4. Аналіз факторів впливу на поширення гідроакустичної хвилі у середовищі важливих в урахуванні при моделюванні

Одним із найважливіших параметрів моделювання розповсюдження звуку в будь-якому середовищі є швидкість звуку. Швидкість звуку у водній товщі змінюється залежно від солоності, температури та глибини. Розглянемо ці параметри та як вони впливають на зміну швидкості звуку.

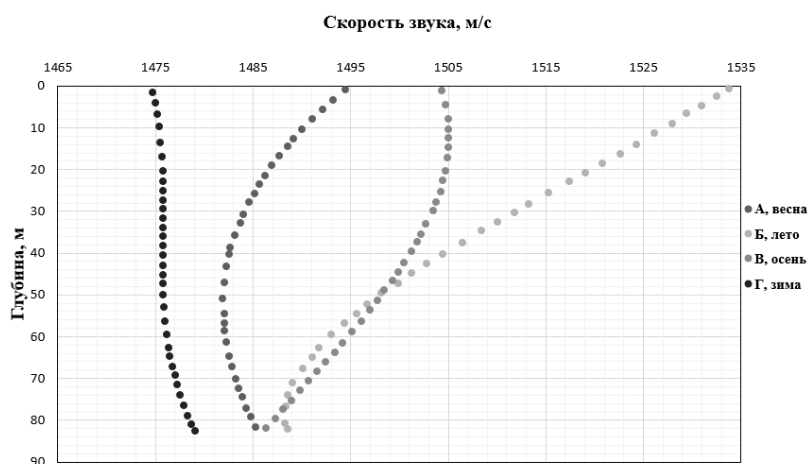


Рисунок 2.1. Зміна швидкості звуку з глибиною відповідно до сезонів

На рис. 2.4.1 показані відмінності у профілі швидкості звуку в залежності від сезону у всьому водному шарі від поверхні моря до дна.

Навесні прибережна вода та зовнішня морська вода надходять із континентального шельфу, змішуються з утворенням змішаної водної маси. При підвищенні температури та зниженні солоності ця водна маса розщеплюється у верхню водну товщу з більш високою температурою та нижчою водною масою з підвищеною солоністю [79].

Влітку температура лежить на поверхні моря різко підвищується. При цьому придонна холодна водна маса, що виникає навесні, переходить у циклонічну циркуляцію, через що температура на дні залишається низькою. Так що влітку профіль швидкості звуку – це градієнт із великим негативним значенням.

Розподіл температури на поверхні Світового океану має зональний характер, який можна описати ізотермами. Розподіл середньорічної температури має зональну градацію. Така закономірність багато в чому обумовлена зональним розподілом сонячної енергії, одержуваної поверхні моря. Конкретні винятки з цієї картини відбуваються в регіонах, де холодніша вода знизу піднімається на поверхню під дією вітрів, і в околицях основних поточних систем, таких як Гольфстрім, де температурне поле спотворене.

В дослідженні [80] розглядається зміна швидкості звуку з сезонами та температурою, зокрема вплив цих змін на прикладі трасування променів. Таким чином, показано, що в окремих акваторіях Світового океану суттєвими є сезонні зміни температури води, які необхідно враховувати в моделі поширення швидкості звуку в морському середовищі.

Швидкість звуку в океані залежить від температури, тиску та солоності. Рівняння показує залежність швидкості звуку C від цих факторів:

$$C(T, P, S) = 1449.2 + 4.6T + 0.055T_2 + 1.39(S - 35) + 0.016D \quad (2.19)$$

- де C – швидкість звуку в м/с,
 T – температура води в градусах Цельсія,
 D – глибина під поверхнею в метрах,
 S – солоність у частках на тисячу.

Типова солоність океану, S , є досить постійною на рівні 35 ppt, тому формула швидкості звуку зводиться до функції температури та глибини.

З рівняння 1 видно, що швидкість звуку сильно залежить від температури води T . Сонячне випромінювання нагріває поверхню океану, хвильова дія має тенденцію змішувати теплу поверхневу воду та створювати поверхневий шар із досить однорідною температурою. У помірних і тропічних водах цей ізотермічний поверхневий шар може простягатися на глибину від 20 м до 200 м. Температура води під цим шаром швидко падає. Така область падіння температури називається негативним термокліном [81].

Глибоке море, куди проникає мало або взагалі не проникає сонячне світло, має рівномірну температуру, коливаючись лише на 1–2 °C на глибині тисяч метрів [80]. У

цих ізотермічних областях швидкість звуку C значною мірою визначається тиском, який неухильно зростає з глибиною. Приріст швидкості становить 0,016 м/с на метр глибини.

Під час поширення звуку під водою необхідно додатково розглядати горизонтальні варіації швидкості звуку чи батиметрії. Тому при розробці моделей поширення швидкості звуку зазвичай проводиться відмінність між проблемами, що не залежать від дальності (море змінюється тільки як функція глибини) та проблемами, що залежать від дальності (море змінюється як функція як глибини, так і дальності). Параметри, відмінні від швидкості звуку та глибини води, також можуть розглядатися в задачах, що залежать від дальності: наприклад, втрати на поверхні, втрати на дні та поглинання [79].

Швидкість звуку є найважливішою гідроакустичною характеристикою морського середовища. Зміна значень швидкості звуку різних точках простору викликає спотворення фронту акустичних хвиль і змінює характер поширення сигналів. Величина швидкості звуку може бути визначена шляхом безпосередніх вимірювань за допомогою спеціальних приладів або на основі обчислень за емпіричними формулами.

Аналітичні методи дозволяють отримати вирази для розрахунку швидкості звуку в залежності від трьох основних параметрів: температури, солоності та тиску (глибини) [81]. Зауважимо, що для вирішення гідроакустичних завдань важливим є не абсолютне значення швидкості звуку, а залежність швидкості від глибини – профіль швидкості звуку. Однак, на практиці, ці параметри виявляють сильну мінливість і варіюються у широкому діапазоні залежно від регіону та пори року.

Тому, стосовно вирішуваної задачі, для створення єдиної апроксимованої моделі розподілу швидкості звуку необхідно проведення натурних експериментальних гідрофізичних досліджень. Для проведення цих досліджень бажано наявність системи, що буксирується, для вимірювання просторових і тимчасових варіацій середньої температури та солоності у вертикальному шарі рідини з контролем глибини буксирування.

2.5. Втрати при поширенні гідроакустичних хвиль

Коли звукові хвилі поширюються, найбільш помітними ефектами є втрата інтенсивності через геометричне поширення (ефект розбіжності) і поглинання акустичної енергії самим середовищем поширення. Ці втрати при розповсюдженні (або втрати при передачі) є ключовим параметром у підводній акустиці, оскільки вони обмежують амплітуду прийнятого сигналу, знижуючи ефективність приймача, яка безпосередньо залежить від співвідношення сигнал/шум [82].

Коли звукові хвилі поширюються від джерела звуку, передана акустична енергія поширюється на великі відстані. Коли енергія зберігається, інтенсивність зменшується обернено пропорційно відстані розповсюдження через поверхню. Цей процес називається геометричними втратами при розповсюдженні.

При розрахунку цих втрат можна виходити з припущення, що в результаті розширення хвильового фронту інтенсивність звукової хвилі змінюється обернено пропорційно відстані від джерела [78].

$$I(r) = \frac{I_0}{r^n} \quad (2.20)$$

де I_0 – інтенсивність, створювана джерелом на одиничній відстані,

r – поточне значення відстані,

n – показник ступеня (у разі ідеального непоглинаючого середовища для сферичних хвиль $n=2$)

Наприклад розглянемо випадок, коли середовище – однорідне, нескінченне середовище, з точковим джерелом, що випромінює у всіх напрямках. Енергія, що передається, зберігається, але поширюється по сферах все більших і більших радіусів. Для такого випадку зниження локальної гідроакустичної інтенсивності між точками радіусів R_1 і R_2 обернено пропорційно співвідношенню поверхонь їх сфер Σ_1 і Σ_2 :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1} = \frac{4\pi R_2^2}{4\pi R_1^2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \quad (2.21)$$

де R – радіальні відстані джерела.

Звідси випливає, що інтенсивність зменшується на $1/R_2$, а тиск на $1/R$. Втрати на розширення може бути розглянута з точки зору деякого еталонного джерела і виражатися в dB [77]:

$$dB = 20 \cdot \log \left(\frac{R}{R_{lm}} \right) \quad (2.22)$$

Втрати розширення сферичного фронту хвилі зазвичай виражаються як $dB = 20 \cdot \log(R)$. Цей вираз наводиться без прив'язки до одиниці виміру відстані. Природно, що такий запис є некоректним з погляду фізики процесу, але через зручність використання вона набула широкого поширення в гідроакустиці.

У процесі оцінки втрат на сферичне поширення, спрямоване від точкового джерела, використовується як перший наближення при оцінці втрат на поширення. Для такого випадку еталонний рівень у метрі еталонного діапазону R_{lm} в однорідному середовищі. Тоді втрати на поширення можна записати в загальному вигляді[79]:

$$dB = 20 \cdot \log \left(\frac{R}{R_{lm}} \right) + \alpha R, \quad (2.23)$$

де αR – деякі втрати, суть яких буде розкрито нижче.

На рис. 2.5.1 представлені розрахункові значення згасання на поширення для деякого спектра частот, для умов навколишнього середовища: $T=10$ °C, $S=35$ ‰, глибина 10 м. Найчастіше формула (1.10) достатня оцінки втрат. Однак деякі програми вимагають спеціально адаптованих моделей поширення (геометричні промені, метод нормальних мод, параболічне наближення).

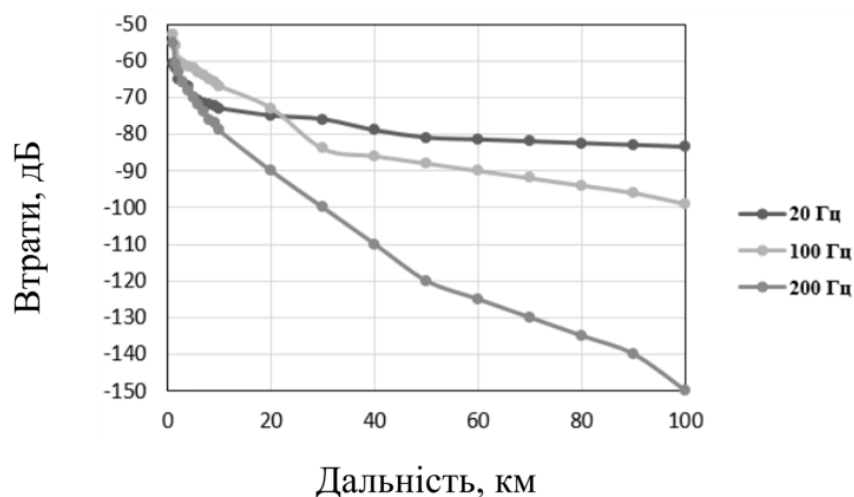


Рисунок 2.2. Розрахункові значення згасання на поширення для частот 20 Hz, 100 Hz, 200 Hz відповідно

Таким чином, втрати на поширення відіграють важливу роль у процесі обліку втрат енергії при розповсюдженні гідроакустичних хвиль і повинні обов'язково враховуватись у математичній моделі.

У морському середовищі внаслідок дисипативних процесів частина акустичної енергії поглинається середовищем та переходить у теплову. При цьому інтенсивність і амплітуда хвилі згасає не тільки через розширення фронту хвилі, а й унаслідок поглинання енергії середовищем, яке викликається, зокрема, в'язкістю (внутрішнім тертям).

Враховуючи дисипативні втрати, напруга в'язкого тертя T буде пропорційною швидкості деформації частинок середовища[80]. Для плоских хвиль, що розповсюджуються вздовж осі x напруга в'язкого тертя запишеться у вигляді

$$T = \mu \frac{\partial \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)}{\partial t} = \mu \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (2.24)$$

де μ – коефіцієнт в'язкості середовища,

ξ – усунення частинок середовища.

Ефект поглинання формально можна врахувати запровадженням комплексного модуля об'ємної пружності $\tilde{\chi} = \chi + i\omega\mu$, комплексної швидкості звуку $\tilde{c} = \sqrt{\tilde{\chi} / \rho_0}$ та комплексного хвильового числа $\tilde{k} = \omega / \tilde{c}$.

Амплітуда хвилі зменшується ($\beta > 0$) зі збільшенням відстані за експоненційним законом. Множник є коефіцієнтом просторового згасання і визначає відстань $x = 1/\beta$, на якому амплітуда хвилі зменшується в e раз.

Експоненційне зниження тиску дає втрату в дБ пропорційно діапазону поширення[81]: це зручно виражається через коефіцієнт α в децибелах на метр (дБ/м), пов'язаний з β через співвідношення $\alpha = 20\beta \log e = 8.68\beta$. Варто відзначити, практично згасання звуку в морській воді найкраще представляти в одиницях вимірювання dB/km.

У морській воді молекули мають кілька стабільних станів і перехід від одного до іншого залежить від тиску. Ці зміни перетворюють енергію від коливання звукового тиску тепло[80]. Різні фазові зміни мають різний час відгуку. Це запізнення відгуку характеризується часом релаксації або частотою релаксації. Швидкі зміни не вплинуть, оскільки молекули змінюють свій стан занадто повільно. Тому поглинання виявлятиметься на нижчих частотах. Двома основними хімічними речовинами у морській воді, які сприяють вищезгаданій релаксації, є борна кислота та сульфат магнію.

Таким чином, у найбільш загальному вигляді коефіцієнт поглинання для морського середовища можна розкласти на три складові, що відповідатиме в'язкості води, вкладу сульфату магнію і борної кислоти за моделлю Франсуа-Гаррісона[82]:

$$\alpha = A_1 P_1 \cdot \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + A_2 P_2 \cdot \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 \cdot f^2 \quad (2.25)$$

де A_1, A_2, A_3 – коефіцієнти впливу температури,

P_1, P_2, P_3 – коефіцієнти глибини моря (тиск),

f_1, f_2 – частоти релаксації борної кислоти та сульфату магнію відповідно.

Перші два доданки цієї формули показують внесок двох процесів релаксації; третій доданок відповідає в'язкості води. Частоти релаксації f_i та коефіцієнти $A_i P_i$

залежать від температури, гідростатичного тиску та солоності; вони визначаються експериментальним шляхом у лабораторії чи морі. Запропонована формула Франсуа-Гаррісона описує звукопоглинання в широкому частотному діапазоні від 400 Hz до 1 МHz. Результати математичного моделювання цього рівняння дуже близькі до практичних результатів.

Інтенсивність процесу поглинання залежить від співвідношення між швидкістю процесів стиснення та розширення, що викликаються звуковою хвилею, а також від часу релаксації. Хоча в морській воді сульфат магнію становлять лише 4.7 % від загальної ваги всіх розчинених солей, проте їх вплив на поглинання звукових хвиль дуже суттєво.

Теорія, розроблена Стоксом, коефіцієнт поглинання β_μ , обумовлений дією сил в'язкості, в узагальненому вигляді визначається виразом[82]:

$$\beta_\mu = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu \omega^2}{\rho c^3} \quad (2.26)$$

З даної формули видно, що через вплив в'язкості рідини відбувається поглинання, пропорційне квадрату частоти і коефіцієнту в'язкості.

Експериментальні дослідження в галузі гідроакустики дають уточнене значення для поглинання, обумовленого в'язкістю, яке для чистої води записується у вигляді[81]:

$$\beta_\mu = (1 - 3.83 \cdot 10^{-5} h + 4.9 \cdot 10^{-10} h^2) \cdot f^2 \cdot A_3 \quad (2.27)$$

Таким чином, при оцінці втрат потужності та інтенсивності звукового сигналу у воді внаслідок поглинання слід враховувати процеси молекулярної релаксації розчинених у морській воді сульфату магнію та солей борної кислоти. Для їхнього обліку запропоновано емпіричні формули для розрахунку коефіцієнтів згасання.

Збільшення поглинання із глибиною. Глибина є ще одним важливим фактором при розрахунку коефіцієнта поглинання. Якщо частота сигналу випромінюваного об'єкта досить висока, то ефект релаксації сульфат магнію переважатиме, відповідно переважатиме внесок, що вноситься поправкою на глибину

$$\alpha(H) = 1 - 1.37 \cdot 10^{-4} h + 6.21 \cdot 10^{-9} h^2 \quad (2.28)$$

Так, наприклад, при частоті сигналу 100 kHz, якщо ослаблення сигналу поблизу поверхні становить 40 dB/km ($T=14\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S=38\text{‰}$), то на глибині 2000 м воно зменшується до 30 dB/km, і відповідно на глибині 6000 м до 16 dB/km[81].

Таблиця 2.1 Зміна коефіцієнта P_2 формули втрати із глибиною.

Глибина, м	0	500	1000	2000	3000	4000	5000
Коефіцієнт P_2	1	0.93	0.87	0.70	0.64	0.55	0.47

У таблиці 2.1 лише дають порядки величини глибини, які б впливають на згасання, і вони можуть описати кожен конкретний випадок. Для практичного застосування рекомендується використовувати повне рівняння, використовуючи точні температурні та солоні профілі.

Слід зазначити, що ці таблиці лише дають порядки величини, які б вплив глибини на згасання, і вони можуть описати кожен конкретний випадок. Для практичного застосування рекомендується використовувати повне рівняння, використовуючи точні температурні та солоні профілі.

Повітряні бульбашки в морській воді здебільшого викликані рухами поверхні моря, а також рухом корпусів морських суден. Вони утворюють неоднорідний шар, розташований на близькій відстані до поверхні. Найбільш висока концентрація газових бульбашок відзначається у приповерхневому шарі моря завтовшки 10-15 м. На глибинах понад 20 м ефект поверхневих бульбашок можна знехтувати. Максимальне поглинання звукового сигналу створюється резонансними бульбашками, під якими розуміються такі бульбашки, власна частота радіальних коливань яких збігається з частотою звукових коливань, що поширюються у воді [82].

Для визначення власної частоти коливань пляшечки можна скористатися наближеною формулою

$$f_0 \approx \frac{3.25}{r_0} \sqrt{1 + 0.1h}, \quad (2.29)$$

де f_0 – частота;

r_0 – радіус бульбашки,

h – глибина.

Якщо врахувати, що в приповерхневому шарі діаметр бульбашок лежить в межах 0.1-0.4 мм, то можна в першому наближенні вважати найбільш схильним до впливу резонансних бульбашок, діапазон частот яких знаходиться в межах від 8 до 33 кГц. Поверхневі бульбашки також змінюють коефіцієнт відображення звукових хвиль лежить на поверхні моря. Цей ефект екстра-ослаблення необхідно враховувати при моделюванні поширення гідролокаційних сигналів, що поширюються по декількох напрямках і відбиваються на поверхні[81].

Втрата інтенсивності, що передається, може бути змодельована за допомогою локального еквівалентного коефіцієнта поглинання в залежності від індивідуальних характеристик бульбашок та їх статистичного розподілу розмірів.

Таким чином, втрати інтенсивності звукового сигналу в приповерхневому шарі морської акваторії значною мірою обумовлені наявністю повітряних бульбашок у воді, які з'являються внаслідок хвильового руху поверхневого шару води або переміщення морських суден. статистичних параметрів бульбашок.

У процесі оцінки втрат на поглинання слід також враховувати інші втрати. Ще однією причиною поглинання звуку є теплопровідність рідини. Процес поширення звукових хвиль перестав бути суворо адіабатичним[80]. В акустичній хвилі відбувається часткове незворотнє перенесення тепла від місць із вищою температурою (областей стискування) до місць із нижчою температурою (областям розрядження). Через війну відбувається незворотні втрати енергії хвилі. Таким чином, ця причина поглинання за рахунок теплообміну є ще однією причиною втрати енергії звукової хвилі. Однак його внесок незрівнянно менший від втрат, викликаних втратами на молекулярну релаксацію і втрати на в'язкість води.

2.6. Висновки до розділу 2

Морське дно являє собою відбиває і розсіює кордон, що має ряд характеристик, постійних у часі. Морське дно є шаруватим середовищем, що характеризується

щільністю. Його склад може змінюватись від твердих порід до м'яких ґрунтів, тому швидкість звуку поступово або різко змінюється з глибиною. Також через різну стратифікацію донних відкладень на багатьох ділянках звук часто поглинається дном і заломлюється або відбивається всередину. Таким чином, морське дно є середовищем, що поширюється і характеризується як швидкістю зсуву, так і швидкістю звуку стиснення. Підводні хребти та підводні гори можуть ефективно блокувати поширення звуку.

Головними причинами, що впливають на роботу гідроакустичної станції, що вловлює сигнали, що взаємодіють з дном моря, є втрати через поглинання звуку в ґрунті, а також відображення, розсіювання, заломлення та донна реверберація. Перелічені фактори визначають гідроакустичні характеристики дна моря, які у кількісному вигляді надаються за допомогою відповідних коефіцієнтів та їх частотних та кутових залежностей.

Усі розглянуті вище випадки поширення звуку враховували лише вертикальну рефракцію акустичних променів. Зміна швидкості звуку додатково в горизонтальній площині призводить до загальної просторової деформації поля, зміщення траєкторій променів, фазовим спотворень і зміни параметрів залежностей зниження інтенсивності поля з відстанню.

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ НОРМАЛЬНИХ МОД ТА СТВОРЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРОБКИ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ

3.1. Класичний метод нормальних мод. Постановка задачі.

Розглянемо звукове поле точкового джерела в неоднорідному хвилеводі з неперервною швидкістю звуку. У середині шару рішення регулюється рівнянням акустичної хвилі [83].

Нехай ми маємо хвилевод, глибиною z , та радіусом хвилеводу r , тоді акустичний тиск P можна розглядати як функцію, яка залежить від глибини, діапазону та часу – $P(z, r, t)$.

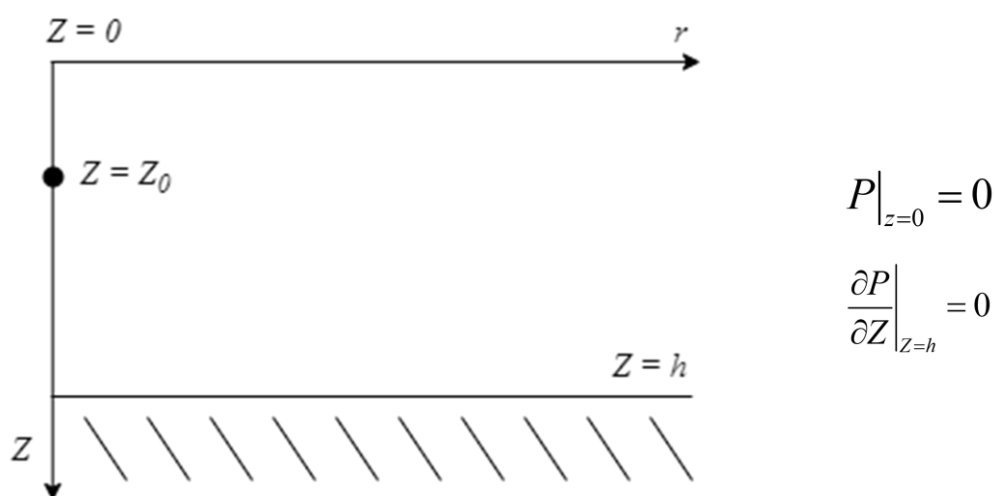


Рисунок 3.1. Геометрична постановка задачі

Перше спрощення, яке ми робимо, це припустити, що нас цікавить лише одна частотна складова, тобто реакція океану на безперервний гул. Таким чином, ми припускаємо, що вихідна часова функція має вигляд $s(t) = e^{-i\omega t}$.

Задача зводиться до знаходження розв'язку двовимірного рівняння Гельмгольца в циліндричній системі координат (r, z) зі звуковою швидкістю $c(z)$ і щільністю $\rho(z)$ [84]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + p(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{p(z)} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(z)} p = \frac{-\delta(z - z_0) \delta}{2\pi r}, \quad (3.1)$$

з граничними умовами $P|_{z=0} = 0$, $\frac{\partial P}{\partial z}|_{z=h} = 0$, а також умовою випромінювання нескінченності $\left(\lim_{r \rightarrow \infty} p = 0 \right)$.

Вибір H_0^1 або H_0^2 визначається умовою випромінювання і оскільки попередньо залежність часу була прийнята за $e^{-i\omega t}$ з додатнім ω і оскільки обраний k відноситься до додатнього напрямку поширення хвилі, ми маємо обрати функцію Генкеля першого типу. Враховуючи це, розв'язок задачі (1) і (2) зображується у вигляді [85]:

$$p(r, z) = \sum_m \frac{i}{4p(z_0)} \Psi_m(z_0) \Psi_m(z) H_0^1(k_m r) \quad (3.2)$$

де $H_0^1(k_m r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_m r}} e^{i\left(k_m r - \frac{\pi}{4}\right)}$, а $\Psi_m(z)$ – визначає форму моди і має $m + 1$ нулів на проміжку $[0, h]$.

Використовуючи асимптотичну апроксимацію функцію Генкеля отримуємо

$$p(r, z) \approx \frac{ie^{-i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{8\pi r p(z_0)}} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_0) \Psi_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}}$$

Позначивши константу розподілення через k^2 , отримаємо наступне модульне рівняння:

$$\begin{cases} p(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{p(z)} \frac{\partial \Psi_m(z)}{\partial z} \right) + \left(\frac{\omega^2}{c^2(z)} - k_m^2 \right) \Psi_m(z) = 0 \\ \Psi(0) = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Модальне рівняння має нескінченну кількість рішень (мод), які характеризуються функцією форми моди $\Psi_m(z)$ та константою горизонтального

поширення k_m . Константи горизонтального поширення різні. Функція $\Psi_m(z)$ є власною функцією, а k^2 або k_m^2 є власним значенням [86]. Усі власні значення менші за $\frac{\omega}{c_{\min}}$, де c_{\min} найменша швидкість звуку в задачі.

Якщо $p(z) = p - \text{const}$, то загальний рівняння

$$\frac{\partial^2 \Psi_m(z)}{\partial z^2} + \gamma_m^2 \Psi_m(z) = 0$$

має вигляд

$$\Psi_m(z) = A \cos \gamma_m z + B \sin \gamma_m z$$

Застосуємо граничні умови

$$\Psi(0) = 0 \Rightarrow A = 0$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right|_{z=h} = 0 \Rightarrow B \gamma_m \cos \gamma_m h = 0 \Rightarrow \gamma_m = \frac{\pi \left(m - \frac{1}{2} \right)}{h}, m = 1, 2, 3 \dots$$

Тоді власні функції рівні: $\Psi_m(z) = B \sin \gamma_m z, m = 1, 2, 3 \dots$

В силу властивості $\int_0^h \frac{\Psi_m^2(z)}{p(z)} dz = 1$, маємо:

$$\int_0^h \frac{B^2 \sin^2 \gamma_m z dz}{p} = 1 \Rightarrow \frac{B^2 h}{2p} = 1 \Rightarrow B = \sqrt{\frac{2p}{h}}.$$

Отже, в силу (3) і (5), формула розрахунку акустичного тиску методом нормальних мод матиме вигляд [85]:

$$p(r, z) = \sqrt{\frac{2p}{h}} \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\gamma_m z_0) \sin(\gamma_m z) H_0^1(k_m r), \text{ де } \gamma_m = \frac{\pi(m - 0,5)}{h} \quad (3.4)$$

3.2. Удосконалення методу нормальних мод на основі введення змінної швидкості звуку

Швидкість поширення акустичних хвиль - це найважливіша гідроакустична характеристика морського середовища. Зміна швидкості звуку в різних точках

простору викликає спотворення фронту хвилі та змінює характер поширення сигналу, що впливає на ефективність використання ехолотів (гідроакустичних засобів).

Швидкість звуку залежить від таких параметрів як [87] глибина моря, пора року, географічний район, час доби.

Величина швидкості звуку може бути визначена шляхом безпосередніх вимірювань за допомогою спеціальних приладів вимірювання швидкості звуку, або обчисленням за емпіричними формулами, що є залежністю виду [88]:

$$c = c_0 + \Delta c(T) + \Delta c(S) + \Delta c(P) + \Delta c(T, S, P), \quad (3.5)$$

де $c_0 = 1449.30 \text{ м/с}$ - опорне значення швидкості звуку при $T = 0^\circ \text{C}$, $S = 35\text{‰}$ і $P = 9,806 \text{ Па}$, інші члени – поправки-приращення, враховують роздільне і спільне вплив різних чинників. Зазвичай від поправки тиску $\Delta c(P)$ переходять до поправки по глибині $\Delta c(Z)$ [89].

Швидкість звуку в океанах змінюється по вертикалі відповідно до змін температури, солоності та гідростатичного тиску. У верхніх шарах океану на поле швидкості звуку найбільше впливає температура води. Тиск сильно впливає на швидкість звуку на великих глибинах, де низькі значення температури і солоності. Зниження температури призводить до зменшення швидкості звуку, а підвищення тиску — до її збільшення.

Звукові промені, що виходять від джерела під певним кутом до горизонту, викривлені, причому напрямок викривлення залежить від розподілу швидкостей звуку в середовищі [90]:

- влітку, коли верхні шари тепліші за нижні, промені вигинаються донизу і здебільшого відбиваються від нижніх, втрачаючи значну частину енергії;
- взимку, коли нижні шари води зберігають свою температуру, а верхні шари охолоджуються, промені вигинаються вгору і багаторазово відбиваються від поверхні води, при цьому втрачається значно менше енергії. Тому дальність поширення звуку взимку більша, ніж влітку.

Внесок розподілу температури, гідростатичного тиску та солоності в конкретних районах океану визначає характеристики вертикального розподілу швидкості звуку, що відповідає[91]:

- Позитивне заломлення (зростання швидкості звуку з глибиною).
- Негативне заломлення (зменшення швидкості та глибини звуку).
- Поверхневий звуковий канал (зростання швидкості звуку з глибиною змінюється зменшенням).
- Підводний звуковий канал (швидкість звуку має мінімум на певній глибині).

Основним джерелом інформації про просторово-часові зміни поля швидкості звуку в Світовому океані є дані гідрологічних станцій. Середнє значення швидкості звуку у Світовому океані прийнято рівним 1500 м/с, а можливий діапазон зміни 1400 - 1600 м/с. Діапазон просторової мінливості відповідає розмірам водойми, а часова – від короточасних синоптичних до сезонних річних коливань. Найбільша варіація спостерігається в приповерхневому активному шарі води з глибинами до 100 - 200 м [92].

Для вирішення задач з поширенням звуку важлива не абсолютна величина швидкості звуку, а залежність швидкості від глибини $c(z)$ - профіль швидкості звуку. При різних видах вертикального розподілу швидкості звуку виникають гідроакустичні явища, які сприятливо або несприятливо впливають на область його поширення.

Великомасштабна вертикальна структура глибоководної води океану, яка визначає тип профілю швидкості, має кілька характерних ділянок різної довжини. Безпосередньо на поверхні знаходиться шар, який піддається прямому впливу всіх метеорологічних факторів. Нижче поверхневого шару знаходиться сезонний термоклін або шар температурних стрибків, де температура різко знижується з глибиною. Влітку і восени в безвітряну погоду сезонний термоклін стійкий і має чіткі межі. Взимку і навесні, а також в Арктиці він зливається з поверхневим шаром, і виділити його неможливо. Нижче сезонного термокліну знаходиться головний

глибоководний термоклін, що піддається незначним сезонним змінам. Основний термоклін - це місце, де спостерігається найбільша зміна температури води. Нижче основного термокліну до дна простягається глибоководний ізотермічний шар з майже постійною температурою.

Швидкість звуку є одним із найважливіших акустичних параметрів у водному середовищі. Швидкість звуку можна розрахувати за формулою[88]:

$$c = \sqrt{\frac{\chi}{\rho}}, \quad (3.6)$$

де χ – коефіцієнт об'ємної пружності;
 ρ — щільність.

Варто зазначити, що для води при температурі 10°C і солоності $S = 15$ проміле, об'ємний модуль пружності $\chi = 2,16 \times 10^{10}$ дин / см².

У морських умовах під впливом зміни температури, солоності і статичного тиску об'ємний модуль пружності і щільність води зазнають значних змін, в результаті чого швидкість звуку може приймати значення приблизно від 1440 до 1540 м/с. Експериментально визначено залежність швидкості звуку від температури, солоності та статичного тиску. Можна навести деякі експериментальні формули, які дають найбільш точний результат. За формулою Вуда[89]:

$$c = 1450 + 4,206t - 0,0366t^2 + 1,137(S - 35) + 0,0175h \quad (3.7)$$

де c – швидкість звуку, м/с;
 t - температура, °C;
 S - солоність, проміле;
 h - глибина, м.

Похибка розрахунку за цією формулою мінімальна при температурах, близьких до 10°C, і різних значеннях солоності. За цих умов різниця між виміряними та розрахунковими значеннями швидкості звуку не перевищує 1,5 м/с. Найбільша похибка (6 м/с) спостерігається для прісної води при температурі 30°C.

Формула Дель Гроссо[91]:

$$c = 1448,6 + 4,618t - 0,0523t^2 + 0,00023t^3 + 1,25(S - 35) - 0,011(S - 35)t + 0,0027x \cdot 10^{-5}(S - 35)t^4 - 2x10^{-5}(S - 35)^4 x(1 + 0,577t - 0,0072t^2). \quad (3.8)$$

Позначення тут такі ж, як і вище. Формула застосовується до швидкості звуку на рівні моря. Щоб врахувати вплив статичного тиску, який лінійно зростає з глибиною, необхідно додати до формули член, який враховує зміну швидкості звуку з глибиною. Зокрема, за Вудом цей доданок дорівнює $0,0175h$ (h - глибина, м).

Формули показують, що зі збільшенням температури, солоності і статичного тиску швидкість звуку зростає, а з підвищенням солоності і статичного тиску – лінійно [92]. Наприклад, підвищення температури на 1°C при температурі 20°C відповідає збільшенню швидкості звуку на $2,7$ м/с, тоді як збільшення солоності на 1 ppt і статичного тиску на 1 атм викликає збільшення швидкості звуку на $1,14$ і $0,175$ м/с відповідно.

Відповідно до досліджень Китайського моря, було виведено наступні формули зміни швидкості звуку у водному середовищі, які відповідають обраній області:

$$c_1(z) = \frac{1}{\sqrt{az + b}}, a = 5.94 \cdot 10^{-10} \cdot c^2/m^3, b = 4.16 \cdot 10^{-7} \cdot c^2/m^3$$

$$c_2(z) = 0.4z + 1950 \cdot c^2/m^3$$

$$c_3(z) = 2000 - 50e^{\frac{z-100}{10}}$$

$$c_4(z) = \begin{cases} 1520, 0 \leq z \leq 29 \\ 1600 - 4z, 20 \leq z \leq 30 \\ 1480, 30 \leq z \leq 200 \end{cases}$$

$$c_5(z) = 0.5z + 1500$$

Використання даних формул дозволить дослідити різні способи задання та порівняти, який з методів є ефективнішим для розрахунків.

3.3. Удосконалення методу нормальних мод введенням часової змінної

Якщо морське дно розділене на ділянки, котрі відповідають однаковому (незмінному) кроку по глибині Δh , тоді $h_n = h_1 + (i - 1)\Delta h = z_n$ (рис. 3.1).

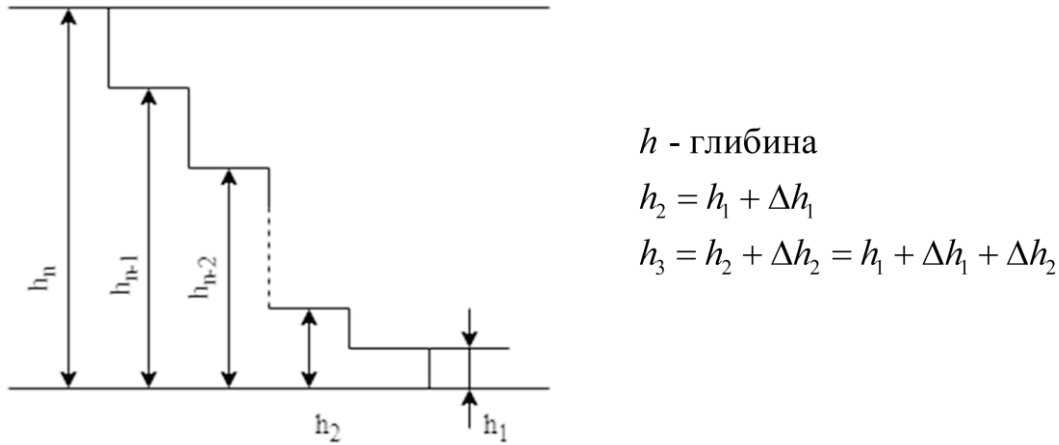


Рисунок 3.1. Постановка задачі моделювання зі ступінчастим дном

Розглянемо акустичну задачу для кожного кроку z_n . Для зручності, індекс n для z . На кожній ділянці будемо рівняння Гельмгольца для точкового гармонійного джерела

$$\Delta \Phi + \frac{\omega^2}{c^2(e, z, \varphi)} \Phi = -\frac{\delta(r - r_0) \delta(z - z) \delta(\varphi - \varphi_0)}{r} \quad (3.9)$$

де $\Phi(r, z, \varphi, t) = \Phi(r, z, \varphi) e^{-i\omega t}$,

ω - частота випромінюваної кругової хвилі,

$$\Delta \Phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}$$

де $\Delta \Phi$ – оператор Лапласа,

$\Phi(r, z, \varphi)$ – амплітуда швидкості,

δ – функція Дірака,

$c(r, z, \varphi)$ – розподілення швидкості звуку.

Для акустичної вільної поверхні $\Phi|_{z=0} = 0$.

Розглянемо акустичну модель n шарової товщини води. Нехай поверхня водної товщі є вільною, а дно хитке на твердій основі.

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=h_i} = 0, \quad i = \overline{1, n-1}$$

Швидкість звуку тоді на кожному шарі, може бути записана як

$$c_i = c_i(z) + c_i^*(r, \varphi), \quad i = \overline{1, n-1},$$

де c_i – рефлекторний член,

$c_i^*(r, \varphi)$ – поправка до швидкості звуку.

На границі кожного шару $z = h_i$ звукове поле має бути неперервним.

$$\lim_{z \rightarrow h_i - 0} \rho_i \Phi_i = \lim_{z \rightarrow h_i + 0} \rho_{i+1} \Phi_{i+1}, \quad i = \overline{1, n-1}$$

$$\lim_{z \rightarrow h_i - 0} \frac{\partial \Phi_i}{\partial z} = \lim_{z \rightarrow h_i + 0} \frac{\partial \Phi_{i+1}}{\partial z}, \quad i = \overline{1, n-1}$$

Нульовим шаром вважаємо шар донного осаду для якого виконується рівність

$$\lim_{z \rightarrow h_1 + 0} \rho_i \Phi = \lim_{z \rightarrow h_0 - 0} \rho_0 \Phi,$$

де ρ_1 – густина води,

ρ_0 – густина осаду.

Тоді $\lim_{z \rightarrow h_1 + 0} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \lim_{z \rightarrow h_1 - 0} \frac{\partial \Phi_1}{\partial z}$, оскільки $n_0 = 0$ та $z_0 = 0$, то $\lim_{z \rightarrow h_1 + 0} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \lim_{z \rightarrow h_1 - 0} \frac{\partial \Phi_1}{\partial z}$.

Знайдемо рішення для кожного глибинного шару води в вигляді суми нормальних мод:

$$\Phi(r, z, \varphi) = \sum_{i=1}^n \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{d=1}^{\infty} R_{ndi}(r) \Psi_{di}(z) \varphi_{mi}(\varphi), \quad i = \overline{1, n-1}$$

де $\{\xi_{di}\}_{d=1}^{\infty}$ і $\{\varphi_{di}\}_{d=1}^{\infty}$ вертикальні власні числа і власні функції на i -му шарі

наступної крайової задачі:

$$\Psi'' + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \xi^2 \right) \Psi = 0 \quad (3.10)$$

$$\Psi(0) = 0, \quad \lim_{z \rightarrow h_i - 0} \rho_i \Phi_i = \lim_{z \rightarrow h_i + 0} \rho_{i+1} \Phi_{i+1},$$

$$\lim_{z \rightarrow h_i - 0} \frac{\partial \Phi_i}{\partial z} = \lim_{z \rightarrow h_i + 0} \frac{\partial \Phi_{i+1}}{\partial z}, \quad i = \overline{1, n-1}$$

$$\lim_{z \rightarrow h_0 + 0} \rho_1 \varphi = \lim_{z \rightarrow h_0 - 0} \rho_0 \varphi,$$

$$\lim_{z \rightarrow z_0+0} \frac{\partial \Phi}{\partial z_0} = \lim_{z \rightarrow z_0-0} \frac{\partial \Phi_1}{\partial z_1}.$$

Без умови неперервності задача вирішена.

Умови неперервності мають виконуватись і для комплексної функції ϕ .

Проінтегруємо формулу 3.10 від 0 до h_1 , попередньо помноживши рівняння на $\rho(z)\Psi_n(z)$:

$$\int_0^{h_1} \Psi_{di}(z)\Psi_{mi}(z)\Psi(z)dz = \delta_{dm} \int_0^{h_1} \rho(z)\Psi_{di}^2(z)dz$$

Введемо коефіцієнт затухання хвилі $k = \frac{\omega}{c^2}(1 - i\gamma)$. Підставимо її в формулу 3.9 з

урахуванням умов неперервності:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r + \frac{dR_{mdi}(r)}{dr} + \left(\xi_{di}^2 - \frac{\eta^2 m}{r^2} - \frac{\omega^2}{(c_0 + \Delta r)^2 r^2} \right) R_{mdi}(r) \right) = - \frac{\delta(r - r_0)}{r} \int_0^{h_1} \frac{\rho(z_0)\Psi_{di}(z_0)}{\rho(z_0)\Psi_{di}^2(z)dz} \phi_{mi}(\phi_0)$$

При невеликому радіусі хвилі, рішення рівняння має вигляд

$$R_{mdi}(r) = D_{md} H_{\lambda mi}^{(1)}(\xi_{ni} r), \text{ де } \lambda_{mi} = \sqrt{\eta_{mi}^2 + \frac{\omega^2}{c_r^2}}$$

Проінтегруємо (3.3.2) в ε -околі r_0 : $\frac{dR_{mdi}(r)}{dr} \Big|_{r_0-\varepsilon}^{r_0+\varepsilon} = - \frac{1}{r_0} \int_0^{h_1} \frac{\rho(z_0)\Psi_{di}(z_0)}{\rho(z)\Psi_{di}^2(z)dz} - \phi_{mi}(\phi_0)$,

$$\text{тоді } D_{md} = - \frac{1}{r_0 (H_{\lambda m}^1(\xi_n r_0))'} \int_0^{h_1} \frac{\rho(z_0)\Psi_{di}(z_0)\phi(\phi_0)}{\rho(z)\Psi_{di}^2(z)dz};$$

Амплітуда потенціальної швидкості

$$\Phi(r, z, \phi) = - \frac{\rho(z_0)}{r_0} \sum_{i=1}^n \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{d=1}^{\infty} \frac{\phi_{di}(z_0)\phi_{mi}(\phi_0)}{\int_0^{h_1} \rho(z)\Psi_{di}^2(z)dz} \frac{H_{\lambda m}^{(1)}(\xi_n r)}{(H_{\lambda m}^{(1)}(\xi_n r))'}$$

Тоді рішення загального рівняння з умовою затухання хвилі в часі має вигляд

$$\Phi(r, z, \phi, t) = - \frac{\rho(z_0)}{r_0} \sum_{i=0}^n \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{d=1}^{\infty} \frac{\phi_{di}(z_0)\phi_{mi}(\phi_0)}{\int_0^{h_1} \rho(z)\Psi_{di}^2(z)dz} \frac{H_{\lambda m}^{(1)}(\xi_n r)}{H_{\lambda m}^{(1)}(\xi_n r)} e^{-i\omega t} \quad (3.11)$$

Для подальших математичних розрахунків потрібні значення наступних функцій $\Phi(r, z, \phi, t)$ і $\phi(r, z, \phi, t)$ при таких значеннях змінних.

$$t = \overline{0,200}, n = 1,2,3, h = 100, c_0 = 1500, (r_0, z_0, \varphi_0) = (0,0,25); (0,0,50);$$

$$\Delta h = 25 \text{ і } \Delta h = 1 - \text{для кожного окремо; } \rho_0 = 1; \omega = 100 \text{ Гц}$$

$$\varphi_{di} = \sin\left(\frac{\pi(d_i - 0,5)}{h} + z_i\right); \varphi_{mi} = \cos\left(\frac{\pi(m_i - 0,5)}{h} + z_i\right)$$

$$\rho(z_0) = 1 \text{ г/см}^3; r_0 = \sqrt{z_{01}^2 + \varphi_0^2};$$

$$\rho(z) - \text{густина середовища випромінювача}$$

$$\Psi_{di}^2 = \xi_{di}^2 - \frac{b^2 m}{r^2} - \frac{\omega^2}{((i + \Delta(r))^2 r^2)};$$

$$\varphi = \omega \left(t_i - \frac{\omega z}{c} \right)$$

$$\omega^2 \left(\frac{z_i}{c} \right) - \omega t_i + \sin\left(\frac{\pi(d - 0,5)}{n} + z_i\right) = 0$$

$$\omega = \frac{\left(t_i - \sqrt{((t_i)^2 - 4 \left(\frac{z_i}{c} \right)^2 \sin\left(\frac{\pi(m_i - 0.5)}{n} + z_i\right))} \right) c}{2z_i}$$

Змінні m,d від 0 до 100.

3.4. Узагальнений метод нормальних мод на основі введення вагових коефіцієнтів

Розглянемо двовимірну задачу поширення звукового поля від точкового джерела в неоднорідному хвилеводі з неперервною швидкістю звуку.

Задача зводиться до знаходження розв'язку двовимірного рівняння Гельмгольца в циліндричній системі координат (r,z) зі звуковою швидкістю c(z) та щільністю ρ(z) [93]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \rho(z) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial P}{\partial z} \right) - \frac{\omega^2}{c(z)} P = - \frac{\delta(r) \delta(z-z_0)}{2\pi r} \quad (3.12)$$

$$P|_{z=0} = 0; \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0 \quad (3.13)$$

Розв'язуючи задачі (3.4.1), (3.4.2) методом нормальних мод, отримуємо функцію вигляду

$$P(r, z) = \sqrt{\frac{2\rho}{h}} \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\gamma_n z_0) \sin(\gamma_n z) H_0^1(k_m r) \quad (3.14)$$

де $\gamma_n = \frac{\pi(0,5-m)}{n}, m=0, 1, 2, \dots$

$$H_0^1(k_m r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_m r}} e^{i(k_m r - \frac{\pi}{4})}$$

При даному підході кожен доданок є відповідною нормальною модою, що не змінюється певний час. При введенні змінної часу доцільно було б просумувати знайдені моди. Такий підхід забезпечить зв'язок між нормальними модами, але не забезпечить вплив кожної моди на систему в цілому. Тому постає необхідність введення коефіцієнтів, що забезпечували вплив нормальної хвилі на систему. В якості таких коефіцієнтів запропоновано використати коефіцієнти полінома Чебишова [93-99], а саме

$$T_k(x) = \cos(k \cos^{-1}(x)), k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.15)$$

Розширення можливо провести за допомогою будь-якої гладкої функції на проміжку $[-1, 1]$, тобто розв'язок задачі (1), (2) можливо зобразити у вигляді

$$P(r, x, z, t) = \sqrt{\frac{2\rho}{h}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \cos(k \cos^{-1}(x)) \sin(\gamma_n z_0) \sin(\gamma_n z) H_0^1(k_m r) e^{-i\omega t} \quad (3.16)$$

Маємо дискретний ряд з урахуванням часової змінної. Інтерполюємо значення отримані за допомогою (3.4.5) лінійною, квадратичною, експоненціальною функціями та сплайном для можливості встановлення неперервної функції апроксимації.

Для отримання даних для інтерполяції використаємо наступні значення:

$$k_m = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - ((m + 0.5) \frac{\pi}{D})^2},$$

де ω -частота поширення звукової хвилі,

C -швидкість поширення звукової хвилі.

$C=1500$ м/с; $\omega=25$ Гц; глибина -100м;

Початкове положення випромінювача (0,0,50), дальність хвилеводу – 5 000м, діаметр – 50м, тоді довжина звукової хвилі рівна 60м. Крок по часу рівний 0,1с, по z -300м.

3.5. Статистичне дослідження створеної математичної моделі

Як правило, будь-яке статистичне дослідження починається і закінчується аналізом виду і форми показників. Узагальнене статистичне дослідження, незалежно від його мети та обсягу, завжди завершується обчисленням і аналізом статистичних показників різних видів і форм вираження. Статистичні показники використовуються для створення, передачі та зберігання інформації про розмір, пропорції, зміни в часі та інші закономірності досліджуваних явищ. Показники, які статистично характеризують досліджувану сукупність у цілому або окремі її частини, називаються узагальнюючими показниками і розрізняються за способом обчислення (первинні та похідні), часовою ознакою (інтервальні та моментні) та аналітичними функціями. Узагальнені показники можуть бути представлені абсолютними, відносними і середніми величинами. Важливою умовою статистичного аналізу є комплексне використання всіх видів узагальнюючих показників.

Статистичне дослідження методу в процесі комп'ютерного моделювання проводилось за допомогою врахування наступних змінних, факторів та методів:

1. Вагові показники
2. Відносні показники
3. Довірчі інтервали для середнього та дисперсії
4. Середня похибка
5. Перевірка гіпотез про вид розподілу даних
6. Вибір та перевірка функцій інтерполяції
 - 6.1 Похибка апроксимації
 - 6.2 Аналіз точності визначення параметрів рівнянь
 - 6.3 Похибка та точність показників апроксимації
 - 6.4 Експоненціальна інтерполяція
 - 6.4.1 Знаходження коефіцієнтів рівняння
 - 6.4.2 Оцінка адекватності побудованої моделі
 - 6.4.3 Прогнозування за допомогою створеної моделі
 - 6.5 Сплайн-інтерполяція

6.6 Квадратична інтерполяція

6.7 Лінійна інтерполяція

6.8 Логарифмічна інтерполяція.

Пункти 6.4.1-6.4.3 повторювались для всіх видів інтерполяції.

Дані про оцінку адекватності побудованих моделей у вигляді похибки апроксимації та похибки відображено в таблиці 1.

Таблиця 3.1 Параметри адекватності побудованих моделей.

Апроксимуюча функція	Похибка апроксимації (у відсотках)	Точність апроксимації
Лінійна	26,9	0,56
Квадратична	14,83	0,9
Сплайн	15,36	0,72
Експоненціальна	14,81	0,88
Логарифмічна	21,2	0,63

Аналізуючи дані, наведені в таблиці, можливо зробити висновок, що апроксимація квадратичною та експоненціальною функціями майже рівноцінні. Враховуючи швидкість комп'ютерної обробки цих функцій рекомендовано для апроксимування вибирати квадратичну функцію. Зобразимо графіки, що підтверджують статистичну гіпотезу (рис. 3.2, 3.3, 3.4).

Графік на рисунку 3.2 зображує залежність залишку змінної t при квадратичній інтерполяції. Як видно з графіку, розподілення результатів нерівномірне, не має фіксованих закономірностей.

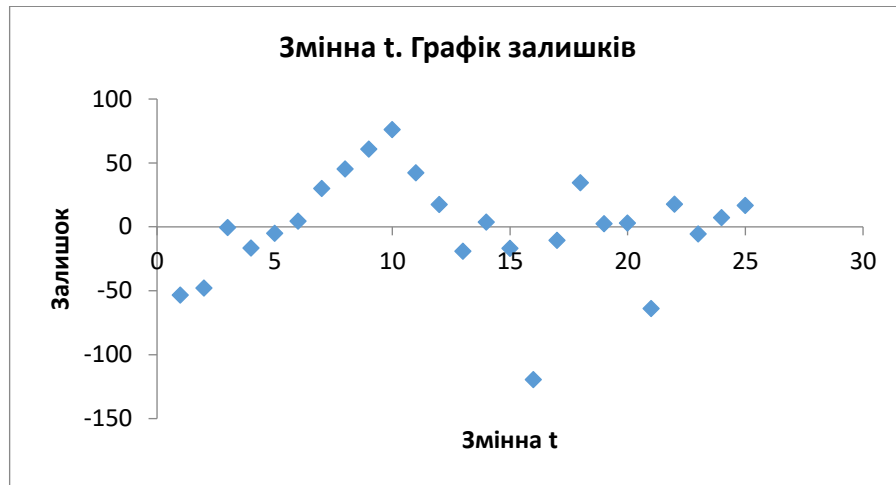


Рисунок 3.2. Графік залишків змінної t при квадратичній інтерполяції

На рисунку 3.3 зображено графік залежності результату від підбраної часової змінної. Отримані значення можна описати прямолінійною функцією, такий підхід дозволяє детально відслідкувати зміни в результатах обчислення при зміні t .

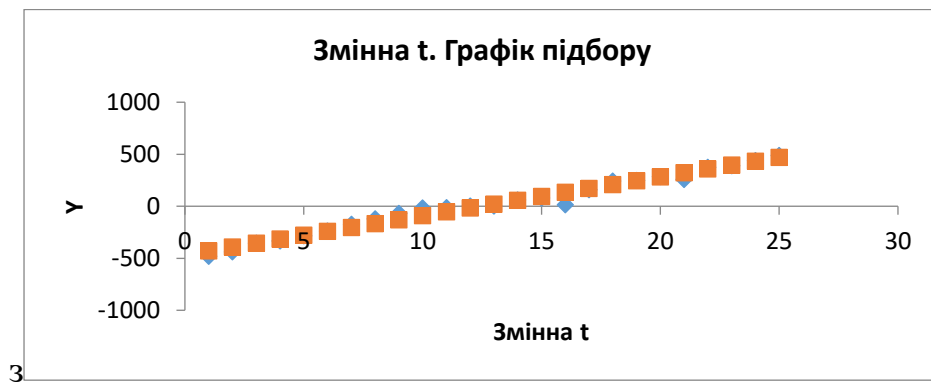


Рисунок 3.3 Графік підбору змінної t

Рисунок 3.4 зображує графік нормального розподілу даних та прогнозовані значення (вісь y). Як видно з графіку, передбачення результатів достатньо близьке, має незначну похибку.

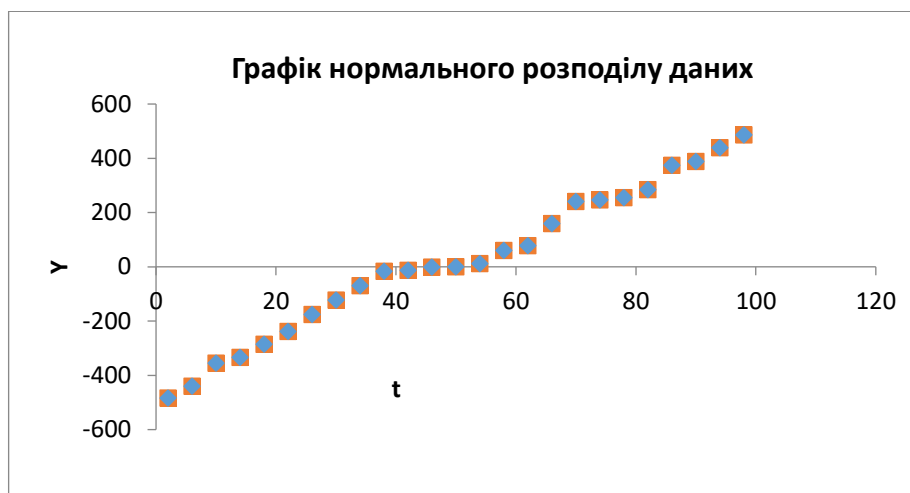


Рисунок 3.4. Графік нормального розподілу даних та прогнозовані значення

Кожне отримане значення ряду відхиляється від його середнього значення на 27.137, це в свою чергу засвідчує про однорідність отриманих даних. Перевірка гіпотез по критеріям Пірсона засвідчує, що значення A_s та E_x підтверджують гіпотезу про нормальний розподіл даних. Нормальний розподіл даних може слугувати як один з критеріїв вибору функції апроксимування для отриманих даних та введеної функції часу.

Також було проведено оцінку доцільності використання коефіцієнтів Чебишова для апроксимації функції зміни амплітуди звукового тиску з часом.

Для проведення обрахунків були використанні наступні вхідні дані:

- Швидкість звуку: $c = 1500$ м/с
- Частота: $f = 25$ Гц
- Глибина середовища: $h = 100$ м
- Положення джерела: $z_0 = 50$ м
- Дистанція: $r = 5000$ м
- Часові точки: t_i від 0 до 10 с з кроком 0.1 с
- Кількість нормальних хвиль: $N = 10$

При порівнянні було проведено дискретне вибіркве обчислення амплітуд P_k з використанням та без використання коефіцієнтів Чебишова в моменти часу t_k та обчислимо коефіцієнти C_n .

Для обчислення середньоквадратичної посилки (MSE) використовувалась наступна формула:

$$MSE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (P_{безЧеб}(t_i) - P_{Чеб}(t_i))^2, \quad (3.17)$$

де M – кількість часових точок.

Для порівняння також оберемо кілька інших методів: метод апроксимації за допомогою сплайнів та метод найменших квадратів з використанням поліномів Лежандра. Використовуючи формулу 3.5.1, виконаємо обчислення для кожного з методів. Результати обчислення представлені у таблиці 3.5.1.

Таблиця 3.2. Результати обчислення середньоквадратичної помилки.

Метод апроксимації	<i>MSE</i>
Використання коефіцієнтів Чебишова	1.2×10^{-3}
Сплайнова апроксимація	2.5×10^{-3}
Поліном Лежандра	1.8×10^{-3}

Метод з використанням коефіцієнтів Чебишова забезпечує найменшу помилку MSE серед розглянутих методів, що свідчить про його вищу точність за даних умов. Кількість необхідних членів ряду для досягнення заданої точності при використанні поліномів Чебишова менше, ніж для поліномів Лежандра. Обчислення коефіцієнтів Чебишова можна ефективно реалізувати за допомогою швидкого дискретного перетворення Чебешова, що зменшує час обчислень. Отримані результати свідчать про доцільність використання коефіцієнтів Чебишова для апроксимації зміни амплітуди звукового тиску з часом у даній задачі. Метод забезпечує високу точність та ефективність обчислень, що є критично важливим для задач моделювання хвильових процесів. Для задач, де важлива висока точність апроксимації часової залежності, рекомендується використовувати поліноми Чебишова. При додаванні до вхідних даних невеликого шуму, метод з використанням коефіцієнтів Чебишова MSE зростає незначно, що свідчить про показав високу стійкість до даного шуму.

На основі проведеного кількісного аналізу з використанням конкретних даних можна зробити висновок, що використання коефіцієнтів Чебишова в задачі моделювання розповсюдження звукових хвиль з часовою залежністю є доцільним і ефективним.

3.7. Висновки до розділу 3

За використанням програмного забезпечення моделювання гідроакустичного поля було проведено комп'ютерне моделювання, за результатами якого отримані залежності дозволяють ввести часовий параметр в розв'язок хвильового рівняння методом нормальних хвиль. Це забезпечує можливість прогнозування розвитку звукової хвилі з плином часу та не потребує додаткових досліджень часової змінної. Наявність часової змінної дозволяє проводити більш глибокий аналіз фізичних та акустичних властивостей звукових полів: поширення їх в підводному каналі, визначення акустичного тиску при вертикальних перетинах середовища в будь-який момент часу, встановлення коефіцієнту збурення в тому числі і в залежності від часу. Перехід до тривимірної моделі рівняння нормальної хвилі з врахуванням часу дозволяє врахувати в подальших дослідженнях зміну параметрів нелінійного процесу з часом. Це дозволяє спрогнозувати подальшу взаємодію звукової хвилі з випромінювачем.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ МЕТОЛОМ НОРМАЛЬНИХ МОД

4.1. Використання модельно-орієнтовного підходу в побудові архітектури програмного забезпечення

Розробку моделі онтології доцільно розпочинати з визначення глибини та масштабу моделі предметної області – предметної області (ПД). Тобто семантична модель (онтологія ПрО) насправді є відповіддю на декілька фундаментальних питань [100]:

- 1) яку галузь знань буде охоплювати семантична модель PR?
- 2) на які типи питань повинні відповідати знання в базі знань?
- 3) які методи отримання нових знань будуть використовуватися в ПС?
- 4) хто і як буде використовувати та підтримувати модель онтології протягом її життєвого циклу?

Звичайно, відповіді на ці питання змінюються протягом усього процесу проектування моделі PR, але в будь-який момент вони дозволяють обмежити масштаб моделі, якщо вона стає занадто складною.

Розглянемо використання методології семантичного моделювання на прикладі ПС для розробки алгоритмів та програмного забезпечення виявлення, класифікації та визначення параметрів руху морських об'єктів [101].

Особливістю такої системи є наявність двох видів інформації [101]:

- 1) реальні дані, отримані в результаті сканування океанського простору (з гідроакустичних приладів);
- 2) дані моделювання, отримані в результаті математичного моделювання поведінки об'єкта.

Моделювання гідроакустичних процесів вимагає розробки компонентних моделей, що включають інформаційну модель водного простору, базу даних параметрів морського середовища (морський шум, властивості ґрунту, берегова лінія,

температура води, глибина, солоність), а також параметри гідроакустичної пристрої та їх взаємодія із середовищем моделювання.

Такий підхід дозволяє поєднати переваги прямого моделювання (для отримання об'єктивних даних про морські об'єкти) з експертними знаннями, представленими у вигляді характерного набору параметрів реальних об'єктів і їх оцінкою на основі досвіду експерта.

Концептуальна модель складається з наступних структурних компонентів:

1. Моделювання морського середовища – виконує функції параметричного налаштування акваторії: глибини, температури, солоності води, типу дна, характеру берегової лінії та ін.), а також налаштування параметрів морських об'єктів для моделювання (вид, розмір, напрямок руху, швидкість, шум тощо).

2. Моделювання гідроакустичної системи - уточнюється розташування фіксуючих пристроїв в акваторії та їх параметри (тип, глибина розміщення, чутливість, спектральні характеристики).

3. Аналіз гідроакустичних сигналів – спеціалізовані інструменти для моделювання гідроакустичних сигналів і методи їх аналізу (швидке перетворення Фур'є, цифрова фільтрація, спектрально-частотний і кореляційний аналіз).

4. Розпізнавання морських об'єктів - набір засобів для визначення параметрів морських об'єктів, включаючи алгоритми кластеризації, нечітку логіку, методи ідентифікації та класифікації об'єктів на основі методів машинного навчання.

5. Ведення бази знань - містить набір інструментів для створення та підтримки бази даних, включаючи редактор онтології, DL Query, SPARQL, Semantic Web Rule Language, засоби інтеграції з базами даних (реляційними та нереляційними).

6. Механізм логічних міркувань (Reasoners) – призначений для організації логічного висновку на основі накопичених знань. Включає інструменти для створення правил, самонавчання та адаптації.

7. Засоби адміністрування та управління - призначені для управління сервісами та програмами доступу користувачів до інформаційних ресурсів, безпеки та продуктивності системи моделювання.

Пропонована ПС повинна забезпечувати документування експериментів на всіх етапах їх проведення. Крім того, в ньому має зберігатися інформація з експертними оцінками, які виводяться під час експериментів. Це сприяє формуванню достовірних знань про досліджувані процеси.

Процес створення системи моделювання ідентифікації та класифікації морських об'єктів передбачає:

- створення та підтримка бібліотеки гідроакустичних моделей, що включає: моделі генерації сигналів, моделі виділення сигналів, моделі аналізу сигналів, реалізацію алгоритмів ідентифікації та класифікації об'єктів;
- формування класифікаторів ПС (гідроакустичних систем, акваторій та інших);
- створення засобів введення та зберігання даних обох типів, як модельних, так і реальних даних, отриманих під час спостереження за акваторіями;
- розроблення онтології предметної області для створення на її основі бази знань;
- розроблення інтерфейсу для налаштування умов моделювання сцени (характеристики акваторії, шум моря, властивості дна, берегової лінії, температура води, глибина, солоність тощо) та створення сценарію (послідовності дій) експерименту ;
- розроблення засобів реєстрації та документування результатів експериментів, а також ведення системи зберігання;
- розроблення або адаптацію алгоритмів і ПЗ для ідентифікації та класифікації морських об'єктів;
- розроблення інтерфейсів користувача для формування правил логічного висновку з метою отримання нових знань на підставі побудованої онтології.

Природно припустити, що для успішного функціонування моделює системи з використанням знань, перш за все, слід зосередити зусилля на розробці моделі онтології ПрО в термінах теорії обробки знань.

4.2. Побудова онтології предметної області

Початковим етапом семантичного моделювання є побудова концептуальної моделі ПрО. Це означає, що необхідно визначитися, як будуть представлятися в онтологічних моделях суті створюваної ПС: об'єкти, класи основні концепти, відносини між класами, характеристики класів, аксіоми, екземпляри класів і інші компоненти онтології [102].

Формально концептуальну модель онтології ПрО - можна представити у вигляді математичного виразу

$$Ont(SD)_{IS} = \left\langle C^{(Ax)}, Rel^{(H)}, T^{(A)}, Ax^{(s)}, Ex^{(C)}, Rul^{(S)} \right\rangle, \quad (4.1)$$

де $C^{(Ax)}$ - підмножина класів (<Classes>) основних концептів - понять ПрО Е (<Entities>), які відображають їх сутності;

$Rel^{(H)}$ - підмножина відносин (<Object properties>) між класами $C^{(Ax)}$ і властивостями $T^{(A)}$, які задаються предикатами $Rel^{(H)}$ - дієсловами і через які описуються відносини (типи зв'язків) в ПрО;

$T^{(A)}$ - підмножина атрибутів (<Data properties>), які описують властивості класів (типи даних, області значень);

$Ax^{(s)}$ - підмножина аксіом (<Axioms>), що визначають основні поняття ПрО, які завжди для неї правдиві. Аксіоми записуються предикатами першого порядку і задають правила виведення для вирішення функціональних завдань ПС;

$Ex^{(C)}$ - безліч екземплярів (<Instances>) класів $C^{(Ax)}$, які використовуються для наповнення БЗ конкретними прикладами, котрі характеризують клас в моделі онтології, і беруть участь у формуванні логічного висновку на основі правил;

$Rul^{(S)}$ - підмножина правил логічного висновку для отримання нових знань.

Модель онтології $Ont(SD)$ разом з безліччю індивідуальних примірників класів $Ex^{(C)}$ через підмножина атрибутів класів $T^{(A)}$ і відносин (зв'язків) між ними $Rel^{(H)}$ формують БЗ ПрО [103].

Детальний розгляд концептів ПрО і функціональних завдань моделює системи для ідентифікації та класифікації морських об'єктів призводить до виділення наступних основних класів [104]:

1. Експеримент $C^{(Exp)}$ - клас, який визначає характеристики експерименту - ідентифікаційний номер завдання, дату проведення, ідентифікатор дослідника, службові дані.

2. Модель гідроакустичного процесу $C^{(Mod)}$ - клас для опису різних моделей, методів і алгоритмів генерації, відбору та аналізу сигналів, а також методів і алгоритмів ідентифікації та класифікації морських об'єктів.

3. Гідроакустичні об'єкти $C^{(Obj)}$ - клас, що складається з деяких підкласів (морські об'єкти, підводні об'єкти і повітряні об'єкти), який описує властивості об'єктів.

4. Акваторія $C^{(Sea)}$ - клас для опису заданої для експерименту морської зони: тип акваторії, назви і параметри (координати, глибини, температури, солоності, характеристики ґрунтів).

5. Гідроакустична система $C^{(Div)}$ - клас, що описує склад, типи і параметри гідроакустичних пристроїв (спектральні характеристики, чутливість) і координати розташування системи в заданій акваторії.

6. Сцена експерименту $C^{(Sn)}$ - клас для опису сцени моделювання, з урахуванням характеристик морського району, а також характеристик об'єктів, що беруть участь в експерименті.

7. Сценарій моделювання $C^{(SnM)}$ - клас для завдання послідовності виконання окремих етапів моделювання. Кожен етап це - набір процедур «запуск - виконання - фіксація результату».

8. Оцінка моделі $C^{(Val)}$ - клас для фіксації результатів моделювання і оцінки коректності моделей.

9. Акустичний сигнал $C^{(Sig)}$ - клас, який визначає характеристики сигналу, включаючи дату виявлення сигналу, а також параметри розташування пристрою і умови експлуатації.

10. Хвилевід $C^{(Wave)}$ - клас для опису середовища поширення акустичних сигналів (вода-вода, вода-повітря, вода-дно) і перешкод на шляху поширення сигналів, а також засоби нейтралізації перешкод.

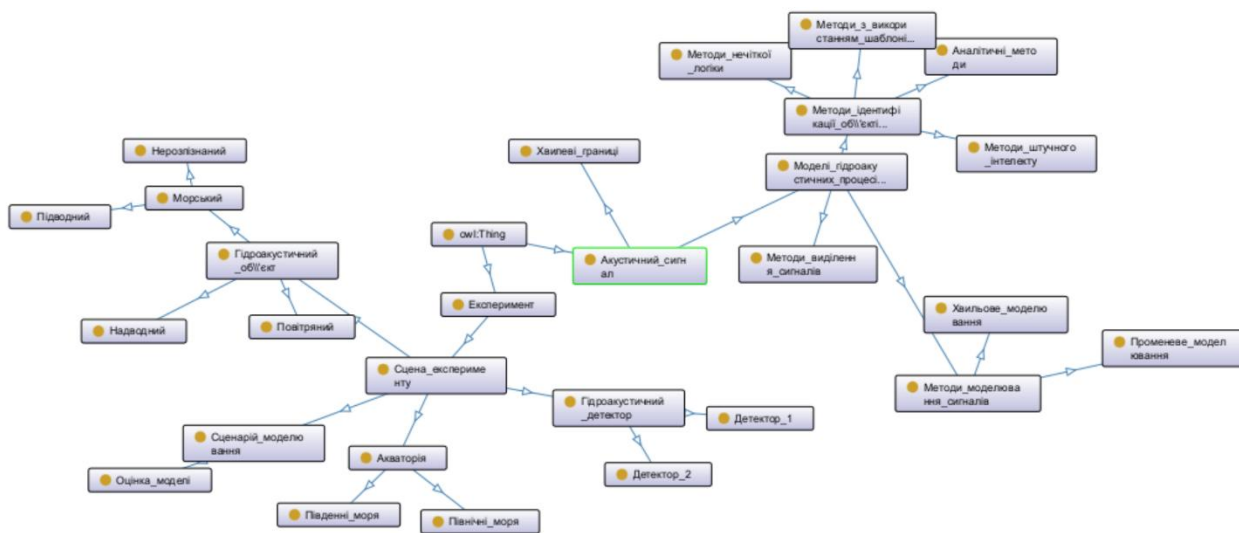


Рисунок 4.1 Онтологічна модель предметної області.

Відповідно до основних правил мови OWL, клас описується триплетом, який можна інтерпретувати у вигляді RDF-графа. У цьому графі вершинами є суб'єкти та об'єкти, а в якості дуг - предикати. З математичної точки зору триплет є екземпляром деякого бінарного відношення. Триплет стверджує, що певний стосунок, виражений через предикат, пов'язує суті, позначені як суб'єкт і об'єкт в конкретному в триплеті [107].

Найбільш відомим інструментальним засобом семантичного моделювання є редактор онтологій Protégé 5, розроблений у Стенфордському університеті - Free open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Редактор онтологій Protégé 5 реалізує концепцію візуального проектування. Візуальні методи проектування онтології сприяють швидшому і повного розуміння структури знань ПрО, особливо це вагомо для користувачів, що працюють в новій предметній області. Protégé 5 дозволяє підтримувати всі фази життєвого циклу онтології відповідно до вимог ISO / IEC 15288: 2002 - від розробки семантичної мережі понять ПрО до створення і супроводу БЗ [108].

Редактор онтології Protégé 5 реалізує модель подання знань ОКВС (Open Knowledge Base Connectivity), і відображає дані у вигляді фреймів, але крім фреймів редактор підтримує найбільш поширені мови представлення знань (SHOE, XOL, DAML + OIL, RDF / RDFS, OWL2) [109].

Кожна модель онтології Ont (SD) створюється з використанням унікального імені - ідентифікатора ресурсу (URI). Безумовно, в процесі проектування онтології може бути змінена, можуть бути додані і відредаговані імена класів, анотації, а також інші компоненти моделі [110].

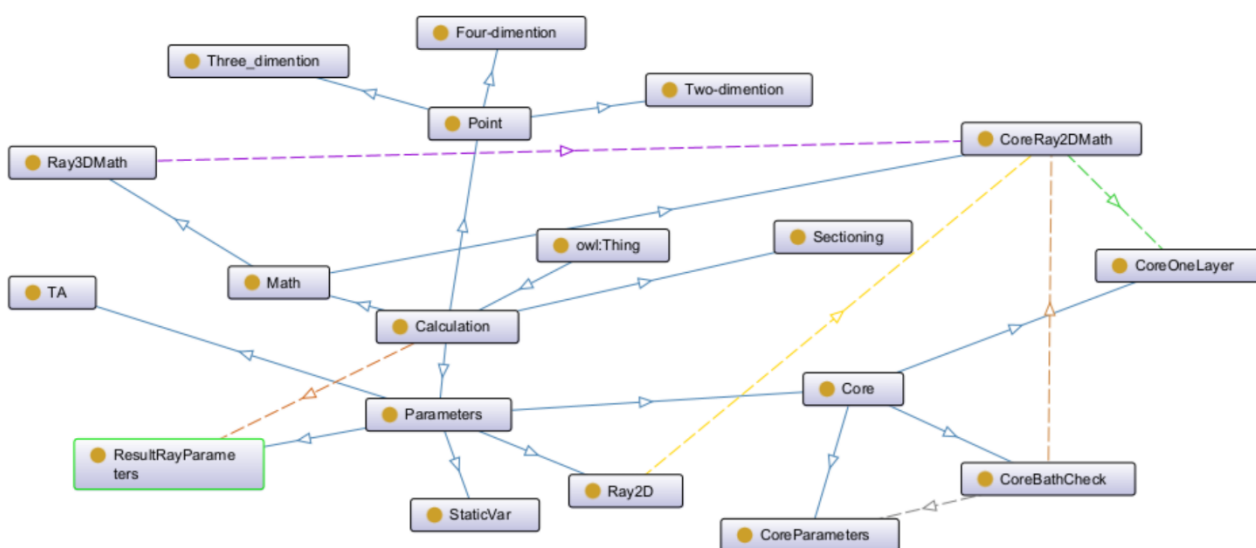


Рисунок 4.2. Онтологічна модель програмного забезпечення.

У мові онтології OWL2 кожен клас доповнюється властивостями, які дозволяють описувати зв'язки між класами або визначають характеристики класів і їх примірників (як якісні, так і кількісні) [111]. Саме ця якість в поєднанні з логічними правилами виведення дозволяє використовувати онтологічну модель ПрО для виведення нових знань.

У версії OWL2, реалізованої в Protégé 5, для опису властивостей класів використовуються два типи виразів[112]:

– `<ObjectProperty>` - описує стосунки (типи відносин, зв'язків у вигляді дієслова), які встановлюються між окремими класами онтології або їх екземплярами.

– $\langle \text{DatatypeProperty} \rangle$ - описує специфічні атрибути (характеристики), які визначають клас онтології. Наприклад, швидкість морського об'єкта, його розміри, технічні параметри тощо.

У створюваній системі властивості класів C (Ax) описуються атрибутами (Attributes) $T(A)$, які використовуються для введення конкретних значень примірників класів $Ex(C)$ [113].

Технічно формування підмножини атрибутів в редакторі Protégé 5 виконується за допомогою закладки $\langle \text{Datatype Properties} \rangle$. Далі відкривається вікно, в якому міститься $\langle \text{OWL: DataProperty} \rangle$. Після виконання відповідних дій, передбачених процесом, з'являється новий тип властивості (рис. 3.6), наприклад, $\langle \text{Vibration_Speed_Vx} \rangle$.

Повторюючи цей процес, формується безліч атрибутів, що відображають розуміння особливостей побудови онтології. Для складної ПрО OWL: $\langle \text{Datatype Properties} \rangle$ може бути представлена у вигляді ієрархічної структури. Сформовані атрибути вказуються в словнику схеми XML і можуть бути представлені різними форматами даних: цілі числа, з плаваючою точкою, рядки, логічні значення тощо [114-117].

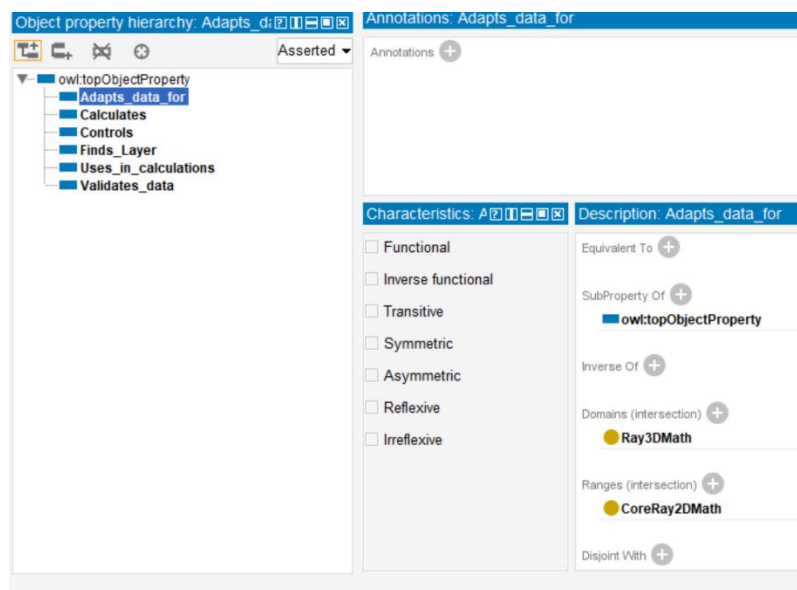


Рисунок 4.3. Задання властивостей класів та об'єктів у середовищі Protege

Слід нагадати, що в семантичній моделі кожен клас $C(Ax)$ описується індивідуальним набором атрибутів, властивих саме цього класу. Методологія побудови семантичної моделі передбачає наповнення БЗ контрольними примірниками - зразками основних класів моделі. На підставі цих зразків виконується перевірка коректності функціонування моделі онтології при відпрацюванні на мовах логічного висновку DL-запитів або SPARQL-запитів до БЗ [118].

Процес формування примірників класів $Ex(C)$ виконується за допомогою закладки <Individuals by class> на панелі інструментів Protégé 5. Після виконання послідовності дій, зазначених в інтерфейсі, з'являється форма <Creat a new OWLNamed Individual> для введення імені нового примірника, наприклад, < Taiwan Strait>.

Процедура <Create a new OWL Named Individual> також використовується для заповнення бази знань тестовими зразками. Для цього необхідно вибрати необхідну процедуру <Individuals by class> і далі вибрати потрібний екземпляр зазначеного класу онтології (наприклад, <Southern_Seas>), вибрати відповідний атрибут, наприклад, <Maximum_depth> і ввести конкретне значення в поле <Value> [119]. Після завершення процедури <Individuals by class> конкретне значення <Value> записується у відповідній екземпляр БЗ $Ex(C)$.

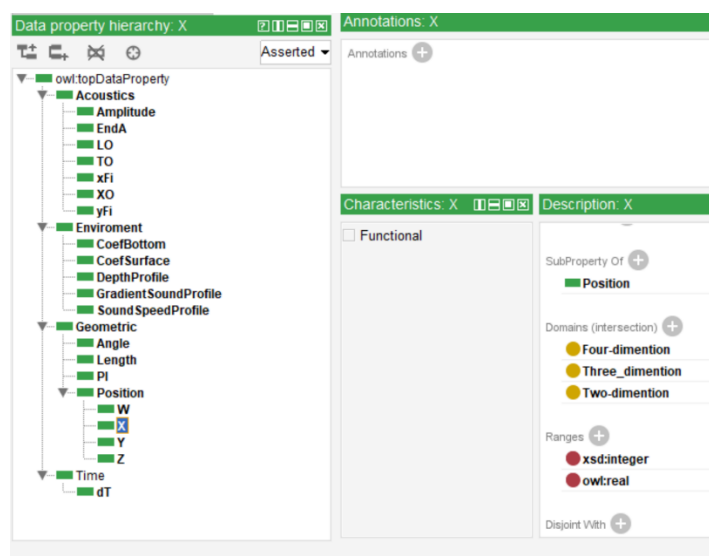


Рисунок 4.4. Задання існуючих даних у системі та їх типи у середовищі Protege

Залежно від семантичного сенсу клас може описуватися визначеною підмножиною атрибутів, тому для створення ефективної БЗ необхідно, щоб екземпляр класу $Ex(C)$ теж містив всі підмножина атрибутів [120-122]. Таким чином, процедура $\langle \text{Individuals by class} \rangle$ додавання значення в поле $\langle \text{Value} \rangle$ повинна повторюватися для кожного атрибута до повного заповнення примірника $Ex(C)$.

4.3. Архітектура програмного комплексу моделювання гідроакустичних сигналів

Архітектура розробки програмного забезпечення — це розроблена структура додатка, яка включає визначення взаємодії компонентів інтерфейсу з внутрішніми процесами програми. Простіше кажучи, це своєрідний підхід, який визначає які функції за що відповідають та як вони взаємодіють між собою.

Точного розуміння та чіткого формулювання цього процесу немає. Основним завданням є створення логічної структури додатка та спрощення взаємодії між розробниками. Це дає можливість надалі вносити зміни до програми, опрацьовуючи конкретні аспекти, а не переробляючи все програмне забезпечення. Архітектура та проектування ПЗ забезпечують гарантію того, що додаток виконуватиме завдання та слідувати своєму призначенню, визначеному під час початкових етапів розробки.

Головна ідея архітектури полягає у тому, щоб знизити складність сприйняття системи внаслідок розмежування повноважень та створення чіткої структури. Архітектура та дизайн програмного забезпечення дозволяють створити чітку структуру, за якою зручно працювати програмістам. Від її якості залежить, наскільки просто проходитиме обслуговування ПЗ, його зміни, доповнення та підтримка.

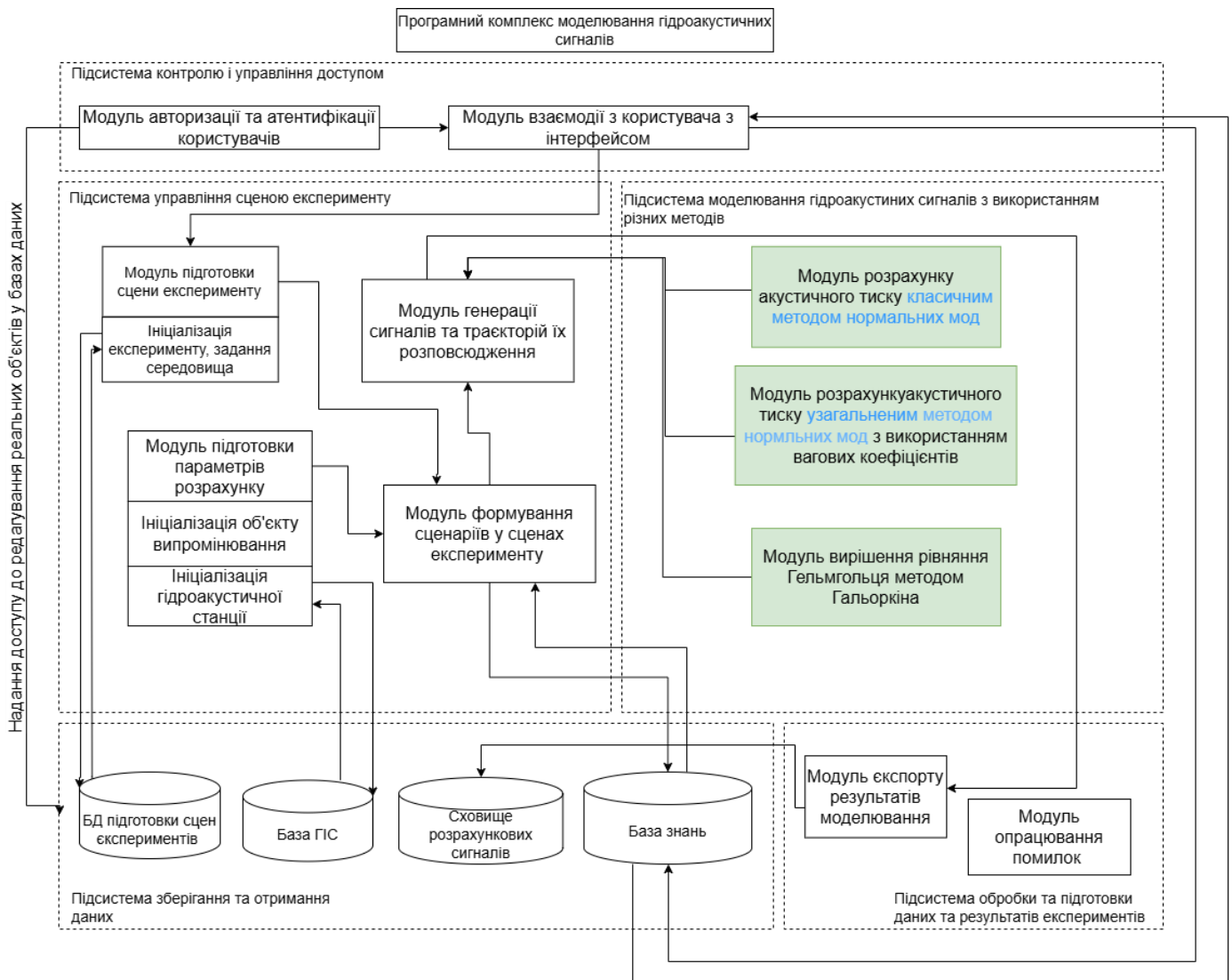


Рисунок 4.5. Архітектура створеного програмного комплексу.

Рисунок 4.5 відображає архітектуру програмного комплексу моделювання гідроакустичних сигналів, який складається з кількох підсистем, що взаємодіють між собою, забезпечуючи повний цикл дослідження акустичних процесів у водному середовищі. У верхній частині схеми представлена підсистема контролю і управління доступом, яка включає два ключові модулі: авторизації та аутентифікації користувачів і взаємодії з користувачем через інтерфейс. Перший модуль відповідає за безпеку роботи системи, перевіряючи особу користувача та його рівень доступу до різних компонентів комплексу. Це важливо, оскільки програмний комплекс може використовувати конфіденційну або критично важливу інформацію, доступ до якої має бути обмеженим для запобігання несанкціонованому використанню. Другий

модуль забезпечує зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для взаємодії з системою, що дозволяє користувачам ефективно налаштовувати параметри експериментів, аналізувати отримані дані та працювати з результатами моделювання.

Наступним важливим елементом є підсистема управління сценою експерименту, яка складається з кількох модулів, що забезпечують підготовку та налаштування умов досліджень. Перший модуль — підготовки сцени експерименту — дозволяє користувачам задавати параметри навколишнього середовища, такі як характеристики водного простору, глибина, температура, рівень солоності, що є важливими для точного відтворення реальних умов. Далі йде модуль підготовки параметрів розрахунку, який займається ініціалізацією об'єкта випромінювання та налаштуванням гідроакустичної станції. Це ключовий етап, оскільки параметри джерела сигналу та приймального обладнання мають значний вплив на кінцеві результати моделювання. Після цього система переходить до генерації сигналів та моделювання їх розповсюдження, що дозволяє відстежити, як акустичні хвилі проходять через середовище, взаємодіють із перешкодами та відбиваються від об'єктів. Завершується цей процес формуванням сценаріїв експерименту, де об'єднуються всі попередні налаштування в узгоджений план дослідження, що дозволяє провести численні симуляції та порівняти результати при зміні певних параметрів.

Окремий розділ схеми присвячений підсистемі моделювання гідроакустичних сигналів, яка використовує різні математичні методи для обчислення та аналізу акустичних полів. У цій підсистемі представлені три основні модулі, кожен з яких відповідає за певний підхід до моделювання. Модуль розрахунку акустичного тиску класичним методом нормальних мод застосовує перевірену математичну модель для аналізу поширення хвиль у середовищі, що дозволяє отримати базові оцінки акустичного тиску в різних точках простору. Модуль розрахунку акустичного тиску узагальненим методом нормальних мод з використанням вагових коефіцієнтів розширює можливості класичної методики, дозволяючи враховувати додаткові параметри, що робить результати більш точними та наближеними до реальних умов. Модуль вирішення рівняння Гельмгольца методом Гальоркіна реалізує ще один підхід

до моделювання акустичних хвиль, що базується на чисельних методах і дає можливість аналізувати складніші сценарії поширення звуку у водному середовищі. Завдяки використанню цих методів система забезпечує гнучкість у виборі розрахункових підходів залежно від завдань експерименту.

Діаграма також містить підсистему збору та отримання даних, яка відповідає за збереження та доступ до необхідної інформації для проведення моделювань. Вона включає кілька баз даних, кожна з яких виконує свою функцію. База даних підготовки сцен експериментів містить налаштування різних сценаріїв, що дає можливість швидко завантажувати готові конфігурації та проводити експерименти на їх основі. Геоінформаційна база (ГІС) містить картографічні дані та інформацію про фізичні параметри середовища, такі як морське дно, течії та природні перешкоди. Сховище розрахункових сигналів використовується для зберігання результатів обчислень, що дозволяє повторно аналізувати вже отримані дані без необхідності проведення нових обчислень. База знань виконує функцію сховища накопичених експериментальних даних, що дає змогу використовувати результати попередніх досліджень для покращення точності майбутніх моделювань.

На завершальному етапі відбувається обробка та підготовка результатів експериментів, що здійснюється відповідною підсистемою. Вона включає модуль експорту результатів моделювання, який дозволяє зберігати отримані дані у зручних форматах для подальшого аналізу або представлення у звітах. Крім того, модуль опрацювання компілюючих даних аналізує та систематизує результати, усуваючи можливі неточності та помилки, що можуть виникнути під час моделювання. Це гарантує високу якість вихідних даних і забезпечує їх готовність для використання в реальних дослідженнях або практичних застосуваннях.

Загалом, дана діаграма демонструє добре структуровану модель роботи програмного комплексу, який охоплює всі етапи процесу — від підготовки експерименту та збору вихідних даних до моделювання, аналізу та експорту результатів. Взаємодія між підсистемами дозволяє досягти високого рівня автоматизації та точності, що є важливим для досліджень у сфері гідроакустики.

Діаграма демонструє структуровану і модульну архітектуру програмного комплексу, яка забезпечує гнучкість у налаштуванні експериментів, потужні засоби аналізу та надійну систему управління даними і користувачами. Така архітектура полегшує інтеграцію нових модулів і функцій, що робить систему масштабованою і адаптованою до змінних потреб досліджень. Крім того, модульність дозволяє легко оновлювати окремі компоненти без впливу на роботу всього комплексу, що підвищує загальну стійкість і ефективність системи.

На рисунку 4.6 діаграма прецедентів відображає взаємодію користувачів із програмним комплексом для моделювання гідроакустичних сигналів, а також описує основні сценарії використання системи. На ній зображені два основних актори: «Науковець» і «Адміністратор», які виконують різні ролі в системі. Науковець займається налаштуванням параметрів експериментів, запуском розрахунків та аналізом результатів, тоді як Адміністратор відповідає за управління доступом і даними в базі. Це чітке розмежування обов'язків сприяє організації робочого процесу та підвищенню безпеки даних у системі. Крім того, така рольова модель забезпечує гнучкість в управлінні правами користувачів.

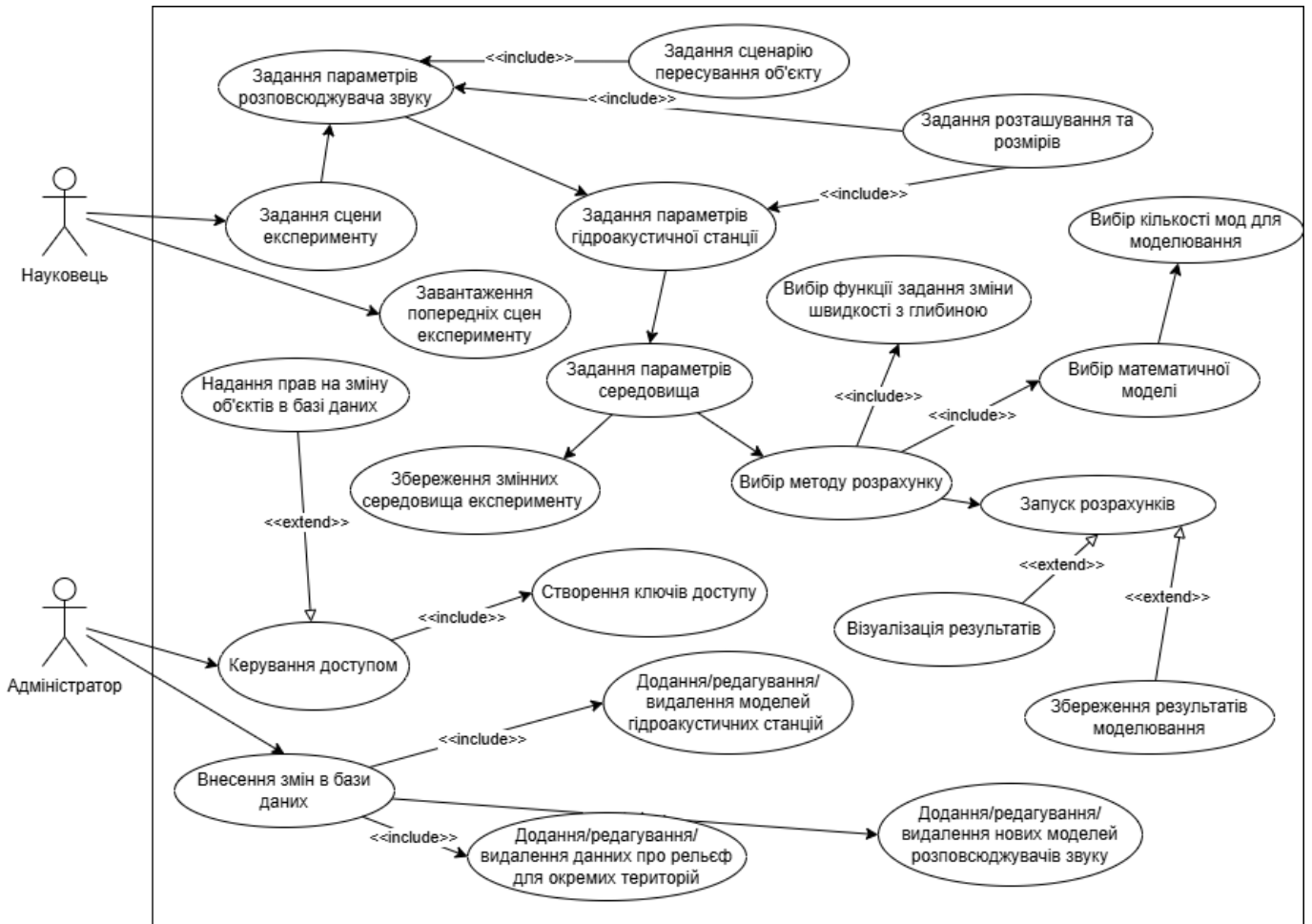


Рисунок 4.6. Діаграма прецедентів програмного комплексу

Науковець має змогу задавати параметри розповсюджувача звуку, гідроакустичної станції та середовища, що визначають умови проведення експерименту. В процесі налаштування він може обирати сценарії пересування об'єктів, їх розташування та розміри, а також задавати кількість мод для моделювання. Ці параметри тісно пов'язані між собою, що відображено зв'язками «include» між відповідними прецедентами. Такий підхід дозволяє моделювати складні сценарії розповсюдження звукових хвиль, враховуючи різноманітні фізичні характеристики середовища. Таким чином, дослідник може точно відтворювати умови реальних експериментів, що підвищує достовірність результатів.

Крім налаштування параметрів, Науковець також може обирати методи розрахунку, математичні моделі та функції зміни швидкості звуку з глибиною. Це дає змогу досліднику адаптувати методику обчислень до специфіки експерименту, що

забезпечує гнучкість моделювання. Після налаштування всіх параметрів здійснюється запуск розрахунків, результати яких можуть бути візуалізовані та збережені для подальшого аналізу. Завдяки цьому Науковець отримує повний цикл роботи з експериментальними даними – від налаштування до аналізу. Такий підхід сприяє ефективності досліджень і дозволяє виявляти закономірності у поведінці гідроакустичних сигналів.

Адміністратор відповідає за керування доступом до системи, створення ключів доступу, а також за внесення змін до бази даних. Він може додавати, редагувати та видаляти моделі гідроакустичних станцій, розповсюджувачів звуку та дані про рельєф для окремих територій. Це забезпечує актуальність інформації в базі даних і можливість адаптації системи до нових дослідницьких потреб. Також Адміністратор може надавати права на зміну об'єктів у базі даних, що дозволяє гнучко налаштовувати доступ до даних. Такий підхід підвищує рівень безпеки та контролю над інформацією в системі.

Зв'язки «include» та «extend» між прецедентами відображають залежності між діями користувачів і підказують послідовність виконання завдань. Зокрема, «include» вказує на обов'язкові кроки в рамках певного процесу, тоді як «extend» показує додаткові функції, що можуть виконуватися за потреби. Наприклад, збереження змінних середовища експерименту включає попереднє завдання параметрів середовища, а запуск розрахунків може супроводжуватися візуалізацією результатів. Це допомагає організувати логіку роботи системи та забезпечити послідовність дій користувачів.

Загалом, діаграма прецедентів демонструє чітку і логічну структуру взаємодії користувачів із системою, відображаючи всі ключові процеси моделювання гідроакустичних сигналів. Розподіл ролей між Науковцем і Адміністратором забезпечує чіткий розподіл обов'язків, підвищуючи продуктивність і безпеку системи. Така архітектура сприяє гнучкості у використанні програмного комплексу, дозволяючи легко масштабувати його функціональні можливості. Це робить систему адаптованою до змінних вимог досліджень і забезпечує її ефективну експлуатацію.

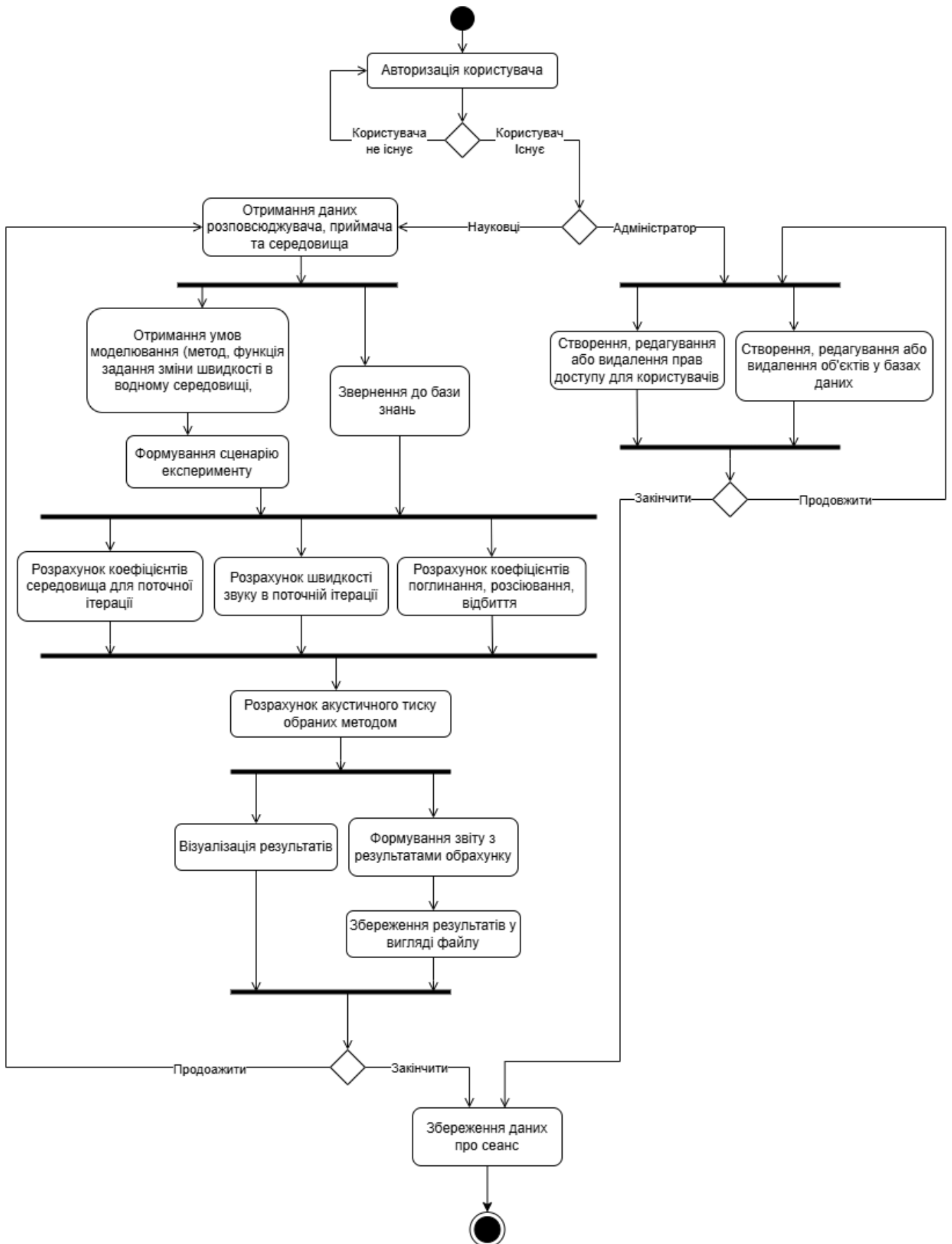


Рисунок 4.7 Діаграма діяльності частини програмного комплексу, яка займається моделюванням гідроакустичних сигналів.

Діаграма на рисунку 4.7 відображає процеси, пов'язані з моделюванням гідроакустичних сигналів у програмному комплексі. Вона починається з авторизації користувача, де перевіряється його наявність у системі. Якщо користувач існує, він отримує доступ відповідно до своєї ролі: науковця або адміністратора. У разі відсутності облікового запису система не надає доступ і завершує виконання процесу. Це дозволяє контролювати безпеку та розмежування прав доступу між різними типами користувачів.

Науковець отримує дані про розповсюджувач, приймач та середовище, а також умови моделювання, що включають методи та функції зміни швидкості у водному середовищі. Після цього виконується серія розрахунків: визначаються коефіцієнти середовища, швидкість звуку, а також параметри поглинання, розсіювання та відбиття. Ці розрахунки є критично важливими для точності моделювання, оскільки навіть незначні зміни у параметрах середовища можуть суттєво вплинути на результати. Всі отримані дані використовуються на наступних етапах аналізу для забезпечення максимальної відповідності моделі реальним умовам.

Далі здійснюється розрахунок акустичного тиску відповідно до обраного методу. Після цього результати візуалізуються, формується звіт з отриманими даними та зберігаються результати у вигляді файлу. Візуалізація допомагає користувачам краще зрозуміти отримані результати, що особливо важливо для аналізу складних акустичних явищ. Збережені дані можуть бути використані для подальших розрахунків або перевірки коректності моделей у майбутньому.

Адміністратор, у свою чергу, займається створенням, редагуванням або видаленням прав доступу для користувачів, а також управлінням об'єктами у базах даних. Його функції включають контроль над збереженням даних і забезпеченням їхньої актуальності. Завдяки цьому система залишається організованою, а користувачі отримують лише необхідний рівень доступу до інформації. Також адміністратор може коригувати бази даних у разі виявлення помилок або необхідності оновлення даних.

Після завершення роботи збереження даних про сесію забезпечує можливість подальшого аналізу та використання отриманої інформації. Це дозволяє системі

зберігати історію обчислень, що може бути корисним для відтворення експериментів або перевірки результатів. Такий підхід підвищує надійність отриманих даних та дає змогу простежити логіку виконаних обчислень. Крім того, збереження сесій допомагає користувачам уникати повторного введення тих самих даних у разі продовження роботи.

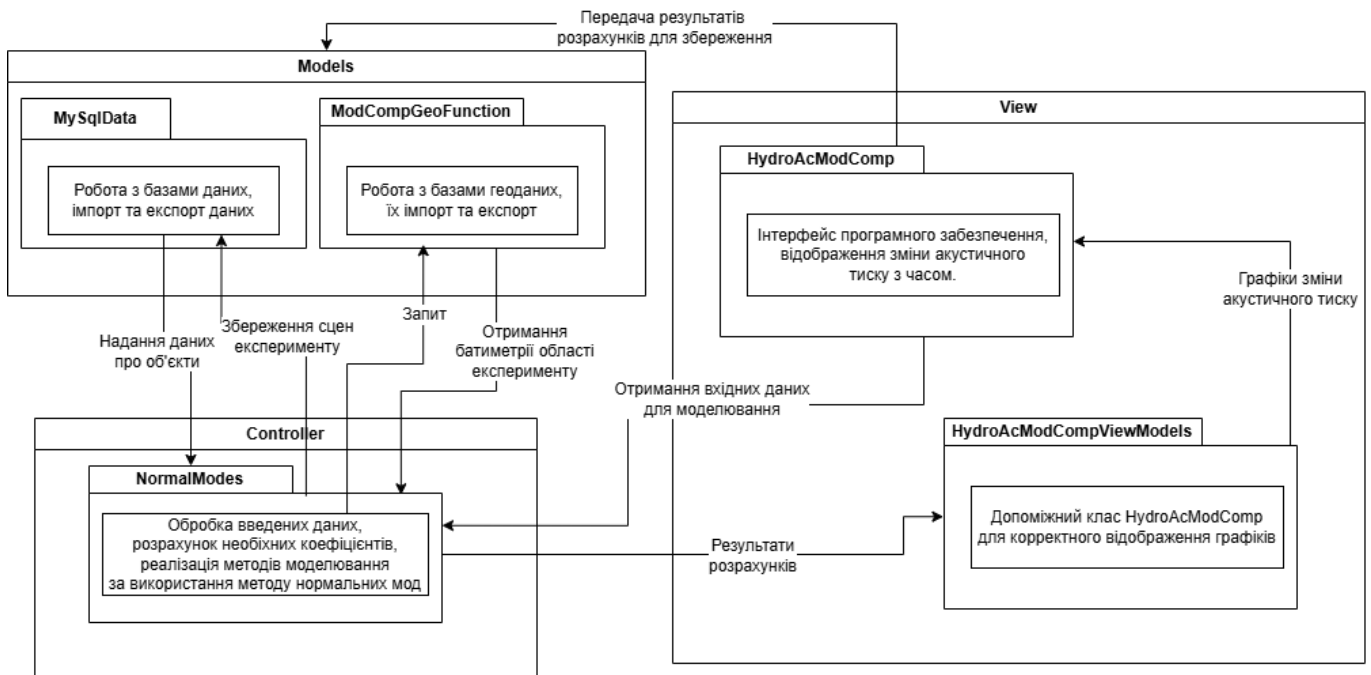


Рисунок 4.8. Організація коду проекту за архітектурним шаблоном MVC

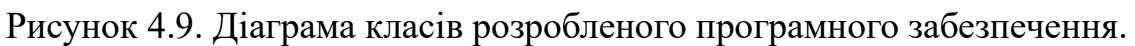
На рисунку 4.8. представлена діаграма, яка ілюструє організацію коду проекту за архітектурним шаблоном MVC (Model-View-Controller). Вона розділяє програму на три основні компоненти: модель, контролер і представлення. Такий підхід забезпечує чітку структуру, що спрощує підтримку та розширення проєкту. У цьому контексті модель відповідає за роботу з даними, контролер виконує обчислення, а представлення відображає результати для користувача. Завдяки цьому підходу розробники можуть незалежно змінювати будь-який з компонентів, не впливаючи на інші частини системи. Це робить систему гнучкою та адаптивною до змін вимог чи розширення її функціоналу.

Модель включає кілька модулів, таких як MySQLData та ModCompGeoFunction, які працюють з базами даних. MySQLData обробляє імпорт, експорт і взаємодію з

базами даних, забезпечуючи отримання інформації про об'єкти. *ModCompGeoFunction* відповідає за роботу з геоданими та отримання батиметрії області експерименту. Ці модулі дозволяють зберігати та обробляти велику кількість даних, що є важливим для точного моделювання гідроакустичних процесів. Вони взаємодіють із зовнішніми джерелами даних, надаючи користувачам актуальну та точну інформацію для подальших розрахунків. Таким чином, модель є основою системи, яка забезпечує доступність та цілісність даних.

Контролер представлений класом NormalModes, який займається обробкою введених даних та розрахунком необхідних коефіцієнтів. Він реалізує методи моделювання, використовуючи метод нормальних мод. Контролер відіграє ключову роль у зв'язку між моделлю та представленням, оскільки саме тут відбуваються всі основні обчислення. Його робота включає перевірку коректності вхідних параметрів, оптимізацію процесів розрахунку та передачу результатів для подальшої обробки. Це дозволяє значно підвищити продуктивність системи та забезпечити точність отриманих результатів. Завдяки цьому підходу система може масштабуватися без значних змін у коді контролера.

Представлення складається з HydroAcModComp та HydroAcModCompViewModels, які відповідають за відображення інформації. HydroAcModComp є інтерфейсом програмного забезпечення, який демонструє зміни акустичного тиску в часі. HydroAcModCompViewModels виконує допоміжну функцію, забезпечуючи коректне відображення графіків. Ця частина архітектури дозволяє користувачам переглядати результати обчислень у наочному вигляді, що полегшує аналіз і прийняття рішень. Візуалізація даних дає змогу швидко виявити закономірності та аномалії, що важливо для наукових досліджень та інженерних розрахунків. Завдяки цьому користувачі отримують інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який спрощує взаємодію з програмним комплексом та аналіз змодельованих процесів.



Розглянемо кожен з реалізованих класів, їх змінні та функції детальніше.

Основна реалізація обчислень знаходиться в класі *Formulae*. Клас складається з наступних методів (рис. 4.9):

- `MethodSonicField(double[] z, double[] r, Constants consts, int modes = 7, int speedType = 1, double z0 = 0.1)` – метод в якому реалізовано розрахунок нормальних мод при заглибленому випромінювачі на глибину z_0 . За замовчуванням, глибина занурення випромінювача 100м, а кількість мод для обрахунку – 7.
- `MethodSonicFieldModified(double[] z, double[] r, Constants consts, int modes = 7, int speedType = 1, double z0 = 0.1)` – модифікований метод обрахунку нормальних мод, який для обрахунку використовує метод `MethodSonicFieldModifiedIter()`. За замовчуванням, випромінювач знаходиться на глибині 100м, кількість мод для обрахунку – 7. Обчислення проводиться через розпаралелювання обчислення нормальних мод.
- `AmplitudeSpeedPotential(double[] z, double[] r, Constants consts, double? z0 = null, int mode = 1, int speedType = 1, double[] t = null)` – метод, який використовує потенціал швидкості для моделювання
- `FiniteDifference(double[] z, Constants consts, int mode = 1, int speedType = 1)` – моделювання нормальних використовуючи кінцево-різницеvu дискретизацію.
- `Haliorkins(double[] z, double[] r, Constants consts, int mode = 1, int speedType = 1, double? zGas = null, KeyValuePair<double, double>[] qs = null)` – метод, який реалізовує розрахунок за формулами Гальоркіна.
- `GradientShift(z: double[1..*], r: double[1..*], consts: Constants, modes: Integer, speedType: Integer, z0: double): Complex[1..*]` - Обчислює зміщення градієнта для звукового поля на основі координат z і r , констант $consts$, кількості мод $modes$, типу швидкості $speedType$, і початкової координати z_0 . Повертає масив комплексних значень для градієнтних змін звукового поля.

Клас *Misc* (рис. 4.9) містить математичні функції, призначені для розрахунку фізичних параметрів в контексті гідроакустичних досліджень. Більшість методів

залежать від фізичних параметрів, таких як частота, швидкість звуку, хвильовий вектор, координати, маса тощо. Результати обчислень повертаються у вигляді комплексних чисел. Цей клас включає різні функції, що використовуються для обрахунку різноманітних параметрів та змінних системи, які необхідні для розрахунку.

`SpeedSupportedTypes: Integer[1..*] {read-only}` - це масив цілих чисел, доступний лише для читання. Він визначає різні підтримувані типи швидкості, які можуть бути використані в обчисленнях, наприклад, швидкість звуку в різних середовищах.

`DensityFunc(z: double, q: double): double` - функція обчислює щільність середовища на основі змінних z (глибина) і q (). Повертає результат у вигляді числа з плаваючою крапкою.

`SpeedFunc(z: double, type: Integer): double` - обчислює швидкість звуку в середовищі на основі координати z та типу швидкості, визначеного цілим числом `type`. Тип швидкості відповідає конкретному середовищу або моделі розрахунку.

`Calc_km(w: double, c: double, m: double, D: double, zi: double): Complex` - обчислює коефіцієнт km , що залежить від частоти хвилі w , швидкості звуку c , маси m , відстані або глибини D , і координати zi . Повертає результат як комплексне число. Це хвильовий вектор або інша фізична величина, пов'язана зі звуковими хвилями.

`Calc_Phi(z: double, q: double): double` - обчислює функцію фази або потенціалу звуку на основі координати z та параметра q . Використовується для аналізу зміни фази або інтенсивності звукової хвилі.

`Calc_kmax(w: double, z: double): double` - обчислює максимальний хвильовий вектор на основі частоти хвилі w та координати z . Повертає максимальне значення як дійсне число.

`Calc_gm(m: double, h: double): double` - обчислює функцію на основі маси m та параметра h – глибини.

`Calc_gm_k(w: double, c: double, k: Complex): Complex` - обчислює комплексну функцію, що залежить від частоти хвилі w , швидкості звуку c та хвильового вектора k (комплексне число).

`Calc_gm_D(m: double, D: double): Complex` - обчислює комплексну функцію на основі маси `m` та відстані/глибини `D`. Використовується для розрахунку розповсюдження звукової хвилі на заданій відстані.

`Calc_H(km: Complex, r: double, level: double): Complex` та `Calc_H1(km: Complex, r: double, level: double): Complex` – функції, які реалізують обчислення функції Генкеля, що залежить від хвильового вектора `km` (комплексного числа), відстані `r` та рівня `level`.

`Calc_J(z: Complex, v: double): Complex` - обчислює комплексну функцію на основі комплексної координати `z` та швидкості `v`, використовується для розрахунку характеристики звукового поля в складних середовищах.

`CalcHv(km: Complex, r: double, v: double): Complex` - обчислює комплексну функцію, яка залежить від хвильового вектора `km`, відстані `r` та швидкості `v`. Можливо, використовується для обчислення хвильових характеристик.

`Calc_Phi_m(z: double, q: double): Complex` - Обчислює фазу або потенціал для певної точки `z` та параметра `q`, але повертає комплексне число. Цей метод більш точний або включає додаткові параметри порівняно з `Calc_Phi`.

`Calc_Miu(z: double, r: double, c: double, gs: KeyValuePair<double, double>): double` - обчислює фізичну величину на основі координати `z`, відстані `r`, швидкості звуку `c` та параметрів, представлених у парі значень `gs`. Повертає результат як дійсне число.

Клас `Constants` (рис. 4.3.5) є важливою частиною програми для моделювання звукових полів у водних середовищах. Він містить параметри, які визначають фізичні характеристики середовища та звукових хвиль, а також функції для ініціалізації та експорту даних.

Методи класу `Constants`:

1. `Constants()` – конструктор за замовчуванням, який ініціалізує об'єкт з базовими значеннями параметрів.

2. `Constants(String)` – конструктор, що приймає рядковий параметр для ініціалізації об'єкта, можливо, задає ім'я або шлях для завантаження констант.

3. Constants(h: double, D: double, waveLength: double, waveFreq: double, r: double)

– конструктор, який ініціалізує об'єкт з конкретними значеннями параметрів, таких як висота, відстань, довжина хвилі, частота та радіус.

4. DefaultInit() – метод для ініціалізації об'єкта з типовими значеннями констант.

Використовується для швидкої підготовки до розрахунків.

5. WriteStream(writer: JsonWriter) – метод для запису поточних значень констант в JSON-формат. Це дозволяє зберігати параметри в зовнішні файли або передавати їх іншим системам.

6. ExportJSON() – метод для експорту даних класу в JSON-формат, що полегшує інтеграцію з іншими програмами або збереження результатів моделювання.

Клас Constants забезпечує роботу з фізичними параметрами, необхідними для точного моделювання звукових полів у водних середовищах. Він включає функції для ініціалізації даних, обчислення фізичних характеристик та експорту результатів у JSON-формат, що робить його критично важливим компонентом програми для моделювання гідроакустичних процесів.

Клас Interpolation (рис. 4.3.6) надає інструменти для інтерполяції та пошуку інтервалів. Він використовується для розрахунків, що включають тривимірні вектори та інтерполяцію значень.

Клас Interpolation має лише одне поле: eps: double – допустиме відхилення або похибка, яка враховується при виконанні інтерполяційних розрахунків для забезпечення необхідної точності.

Методи класу Interpolation:

– searchInterval(a: double, b: double[1..*], j: Integer): Integer - виконує пошук інтервалу в масиві значень b на основі заданого значення a. Повертає індекс інтервалу, в якому знаходиться a.

– Trilinear(x: double[1..*], y: double[1..*], z: double[*], step: double): Tuple<double[], double[], double[][]> - виконує трилінійну інтерполяцію на основі масивів координат x, y, z та кроку step. Повертає кортеж з трьох масивів, що представляють інтерпольовані значення для кожної осі.

- `interpTrilinear(s: Vector3D, e: Vector3D, p: Vector3D): Vector3D` - обчислює інтерполяцію між двома тривимірними векторами `s` і `e`, використовуючи точку `p` для інтерполяції. Повертає новий інтерпольований тривимірний вектор.
- `interpBilinear(tx: double, ty: double, c00: Vector3D, c10: Vector3D, c01: Vector3D, c11: Vector3D): Vector3D` - виконує білінійну інтерполяцію для двох змінних `tx` і `ty` на основі чотирьох точок `c00`, `c10`, `c01`, `c11`. Повертає результат у вигляді тривимірного вектора.

Клас `Interpolation` забезпечує точні інструменти для інтерполяції в тривимірному просторі, використовуючи трилінійні та білінійні методи, а також функцію для пошуку інтервалів в масивах значень.

Методи класу `Helper`:

- `Vector3DMult(v: Vector3D, n: double): Vector3D` - виконує множення тривимірного вектора `v` на скалярне значення `n`. Повертає новий тривимірний вектор як результат операції множення. Ця функція використовується для масштабування векторів у тривимірному просторі.
- `GridCreate(x: double, y: double, xh: double, yh: double, xmin: double, ymin: double): double[*]` - створює двовимірну сітку на основі значень `x` і `y`, що відповідають координатам, а також граничних значень `xh`, `yh`, `xmin` і `ymin`. Повертає масив чисел з координатами сітки, що використовується для моделювання простору в обчисленнях.
- `ConvertTwoToOneDim(input: double[*]): double[1..*]` - перетворює двовимірний масив даних у одновимірний масив. Це корисно для зменшення складності даних або їх подальшої обробки. Повертає одновимірний масив, що містить ті самі дані, що й вхідний двовимірний масив.

Клас `Helper` надає функції для роботи з тривимірними векторами, створення сіток та перетворення двовимірних даних у одновимірні, що допомагає в обчисленнях і моделюванні звукових полів.

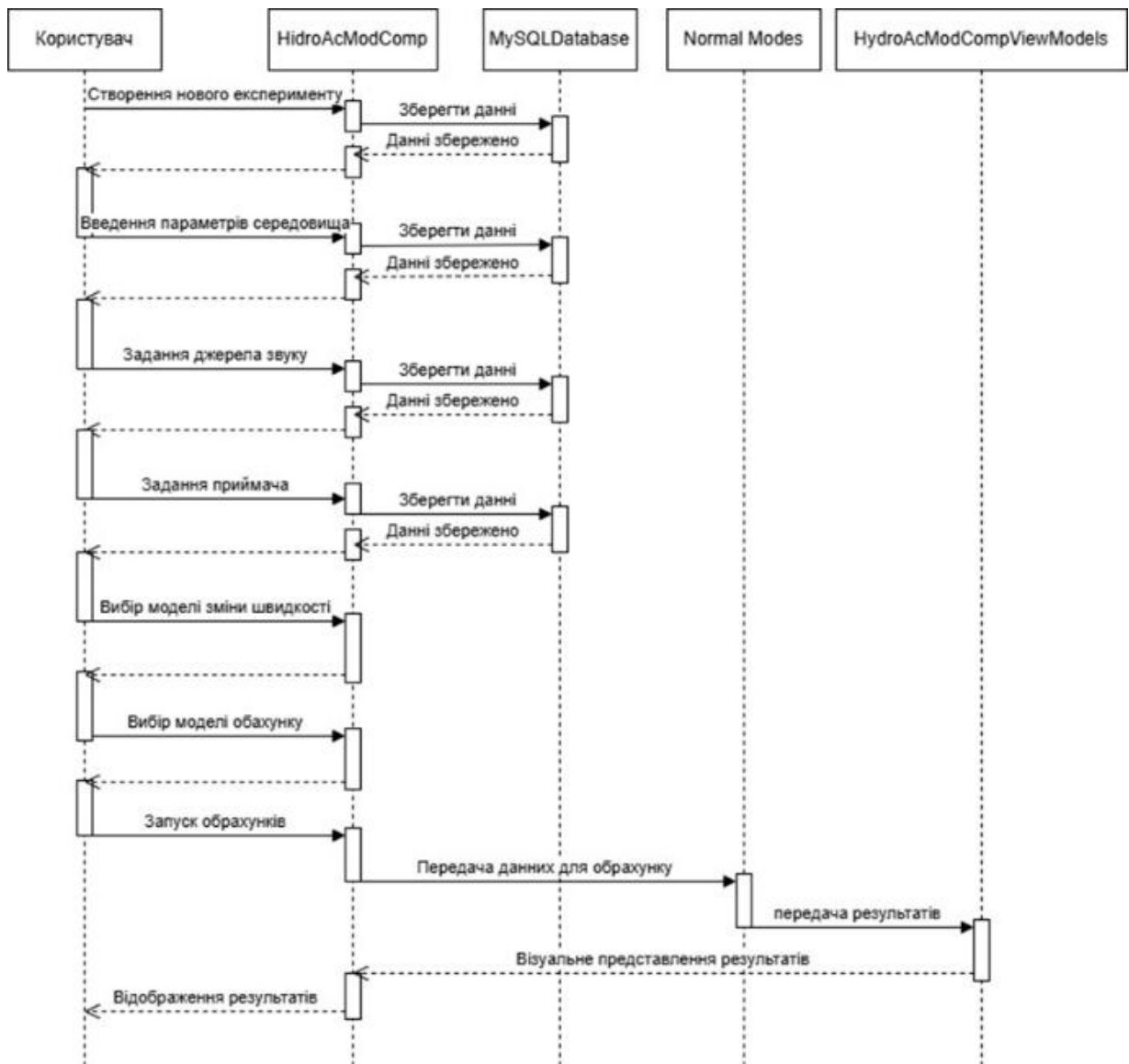


Рисунок 4.10. Діаграма послідовності створеного програмного забезпечення

На рис. 4.10 зображена діаграма послідовності розробленого програмного комплексу, зокрема виділена послідовність в контексті виконання обчислень за допомогою створеного пакету NormalModes. Ця діаграма послідовностей відображає процес проведення гідроакустичного експерименту за участю кількох компонентів: Користувач, HydroAcModComp, MySQLDatabase, Normal Modes та HydroAcModCompViewModels. Користувач ініціює експеримент, вводючи параметри середовища, джерела звуку, приймача, а також вибираючи моделі зміни швидкості звуку та обрахунку. На кожному з етапів введення даних HydroAcModComp зберігає інформацію в MySQLDatabase, яка підтверджує успішне збереження.

Після налаштувань Користувач запускає обрахунки. HidroAcModComp передає дані в компонент Normal Modes, який відповідає за обчислення. Після завершення обчислень результати передаються назад до HidroAcModComp. Цей компонент далі передає результати у HydroAcModCompViewModels для візуалізації.

Фінальний етап передбачає відображення результатів Користувачу у вигляді візуальних уявлень. Діаграма демонструє чітку послідовність дій, а також взаємодію між компонентами, що забезпечує коректність і збереження даних на всіх етапах експерименту.

4.4. Демонстрація результатів роботи та оцінка ефективності створеного програмного комплексу

Для роботи програми, яка виконує моделювання та розрахунки звукових полів у водних середовищах з використанням графічних та числових даних, як на представлених зображеннях, можна виділити наступні вимоги до обладнання (заліза):

Процесор (CPU):

- Багатоядерний процесор (мінімум 4 ядра): моделювання звукових полів потребує значних обчислювальних ресурсів для розрахунків хвильових процесів, інтеграцій та інтерполяцій.
- Частота процесора: рекомендується процесор з частотою не менше 2.5-3.0 ГГц, особливо якщо моделі включають складні математичні функції або моделювання великих областей з високою точністю.

Оперативна пам'ять (RAM):

- Мінімум 8 ГБ ОЗП для базових розрахунків і моделювань.
- Рекомендовано 16 ГБ або більше для комфортної роботи з великими об'ємами даних, такими як профілі звукового поля, численні точки даних та великі розмірності сіток, які можуть вимагати значної кількості оперативної пам'яті.

Програма використовує графічну візуалізацію, як показано на зображеннях (кольорові графіки та тривимірні візуалізації), інтегрований графічний процесор може бути достатнім для базових візуалізацій.

Проте для обробки великих обсягів графічних даних або побудови складних графіків (особливо з високою роздільною здатністю або 3D-візуалізацією) рекомендується:

- Відеокарта NVIDIA або AMD з мінімум 2 ГБ відеопам'яті.
- Рекомендована відеокарта з 4 ГБ і більше, якщо графічна обробка даних є критичною частиною програми.

Мінімум 256 ГБ SSD для операційної системи та програмного забезпечення. SSD-диск значно прискорить час завантаження великих даних і результати моделювання.

Якщо зберігаються великі обсяги даних або результати обчислень, можна використовувати додатковий накопичувач на 512 ГБ або більше.

Windows 10/11 64-bit або Linux (якщо програма може запускатися на різних операційних системах). Операційна система має бути 64-розрядною для підтримки великого об'єму оперативної пам'яті та використання багатоядерного процесора.

Монітор з роздільною здатністю Full HD (1920x1080) для роботи з графічними даними та візуалізацією результатів.

Рекомендовано мати екран з високою роздільною здатністю (наприклад, 2560x1440 або 4K), якщо програмі необхідно працювати з великою кількістю одночасно відкритих даних або виведення результатів на великому графіку чи карті.

Миша та клавіатура: для точної роботи з інтерфейсом програми, вимірюванням на карті та налаштування параметрів.

Доступ до інтернету: якщо програма використовує бази даних або модулі для завантаження моделей або оновлень, може знадобитися стабільне підключення до мережі.

Зовнішній накопичувач або хмарне зберігання: для зберігання великих наборів даних і результатів моделювання.

Програма вимагає потужного багатоядерного процесора, достатньої кількості оперативної пам'яті (мінімум 8 ГБ, рекомендовано 16 ГБ), а також наявності SSD для швидкої роботи з даними. Відеокарта залежить від обсягів графічної візуалізації, а для високоточних обчислень та великих даних краще використовувати спеціалізовані GPU та більший обсяг пам'яті.

Задання сцени експерименту та її параметрів

Інтерфейс програми є інтерактивним та надає користувачеві можливість моделювати та аналізувати звукові поля у водних середовищах. Основні елементи включають карту для роботи зі сценами, панель шарів для керування об'єктами на карті, а також візуалізацію результатів у вигляді кольорових графіків, які дозволяють детально аналізувати результати розрахунків і їх вплив на розповсюдження звукових хвиль у середовищі.

На рисунку 4.4.1 зображений інтерфейс комплексу моделювання звукових полів у водних середовищах. У верхній частині вікна видно меню інструментів, там знаходяться пункти меню Pan і Measuring, які, дозволяють користувачеві переміщатися по карті або вимірювати відстані та інші параметри на мапі. Додаткові елементи карти: Ліворуч від карти є кнопки для масштабування карти + і –, що дозволяють змінювати рівень деталізації.

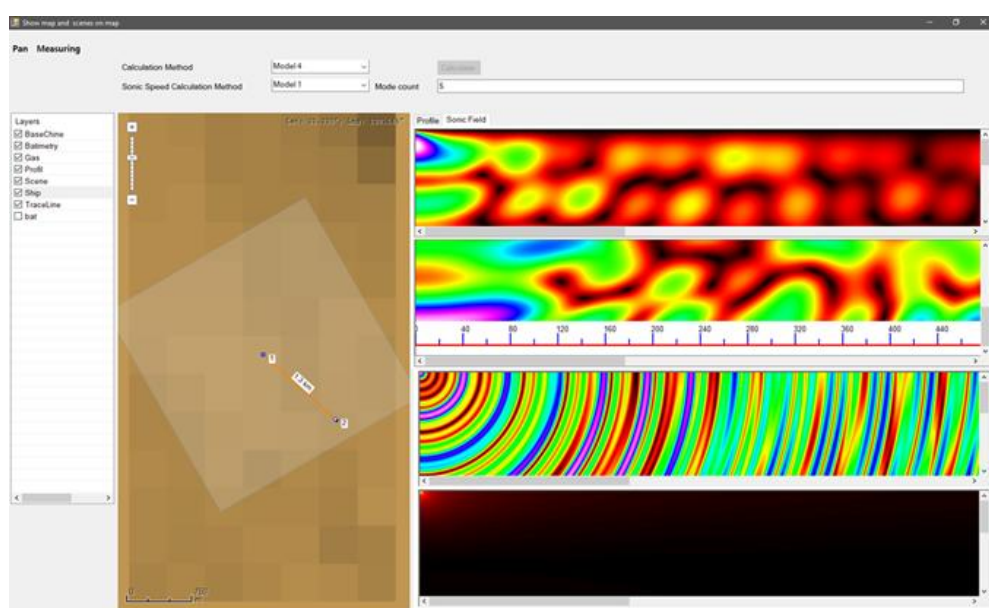


Рисунок 4.11. Приклад роботи створеного програмного забезпечення

Інтерфейс дозволяє користувачеві налаштовувати параметри моделювання, вибирати методи розрахунку звукового поля, переглядати результати на карті та у вигляді графіків. Панель шарів дає змогу керувати відображенням різних об'єктів і сцен на мапі, що робить процес моделювання зручним і візуально інформативним.

Умовно сам інтерфейс можна поділити на три області: зліва область, яка відповідає за введення параметрів середовища, область розташована по середині вікна з мапою, для вибору місця проведення експерименту, область з правої сторони для відображення профілів та результатів.

Правіше знаходиться розділ налаштувань розрахунків. Випадаючий список Calculation Method для вибору методу розрахунків. Обрати можна з наступних варіантів, які відповідає наступним реалізаціям: Model 1 – удосконалений метод нормальних мод (MethodSonicField), Model 2 – метод нормальних мод з використанням паралельних розрахунків (MethodSonicFieldModified), Model 3 – моделювання сигналу вирахування потенціалу амплітуди швидкості (AmplitudeSpeedPotential), Model 4 – реалізація методу Гальоркіна (Haliorkins). Випадаючий список Sonic Speed Calculation Method дозволяє обрати метод розрахунку швидкості звуку. Доступні наступні функції зміни швидкості звуку у водному середовищі з глибиною: гіперболічна, неперервна, постійна, лінійна (змінні зовнішні умови) експоненціальна, похилі сходи. Правіше розташоване поле Mode count в якому можна зазначити кількість мод для розрахунку та кнопка Calculate для запуску на основі вибраних параметрів.

На рисунку 4.12 продемонстровано задання сцени експерименту та розположення гідроакустичної станції. У базі даних комплексу зберігаються моделі існуючих гідроакустичних станцій, а також їхні основні параметри, необхідні для моделювання гідроакустичного середовища, такі як: тип та серійний номер, фізичні параметри. Також програмне забезпечення дозволяє визначити координати і глибину розташування об'єкту, та зберігати ці вхідні значення для використання в майбутніх експериментах.

Як і у випадку з гідроакустичними станціями, в програмний комплекс зберігає існуючі моделі реальних об'єктів, які містять необхідні для обчислень параметри: їхні розміри, координати та глибину занурення. Програмний комплекс дозволяє зберігати задані координати та глибину занурення для відтворення експериментів, а також швидкого налаштування сцени експерименту для проведення обрахунків.

На рисунку 4.12 також можна побачити результат обчислення різними методами (профілі звукового поля): Праворуч від карти відображені декілька кольорових графіків. Вони показують результати розрахунків або моделювання звукового поля у вигляді кольорових профілів. Графіки мають різну кольорову гамму, що ймовірно відображає

- Перший графік презентує результат обрахунків удосконаленим методом нормальних мод: кольорова шкала від червоного до чорного, можливо, інтенсивність звукових хвиль.

- Другий графік демонструє обрахунки розпаралеленим методом нормальних мод: кольорова шкала від синього до зеленого і червоного та показує зміни акустичного тиску з часом.

- Третій графік різні рівні інтенсивності звуку або змін параметрів середовища: кольорова шкала з хвильовими формами, які можуть представляти інтерференцію звукових хвиль.

- Четвертий графік реалізація методу Гальоркіна: затемнений червоний і чорний профіль, який може відображати глибину або інтенсивність звукового поля на великій відстані. Кожен графік має смугу прокрутки, що дозволяє переглядати великі обсяги даних у горизонтальному напрямку.

Як показано на рис. 4.12 після проведення обрахунків, результати обчислень можна також зберігти у вигляді таблиці, де будуть представлені усі проміжні результати, які використовувались для візуалізації.

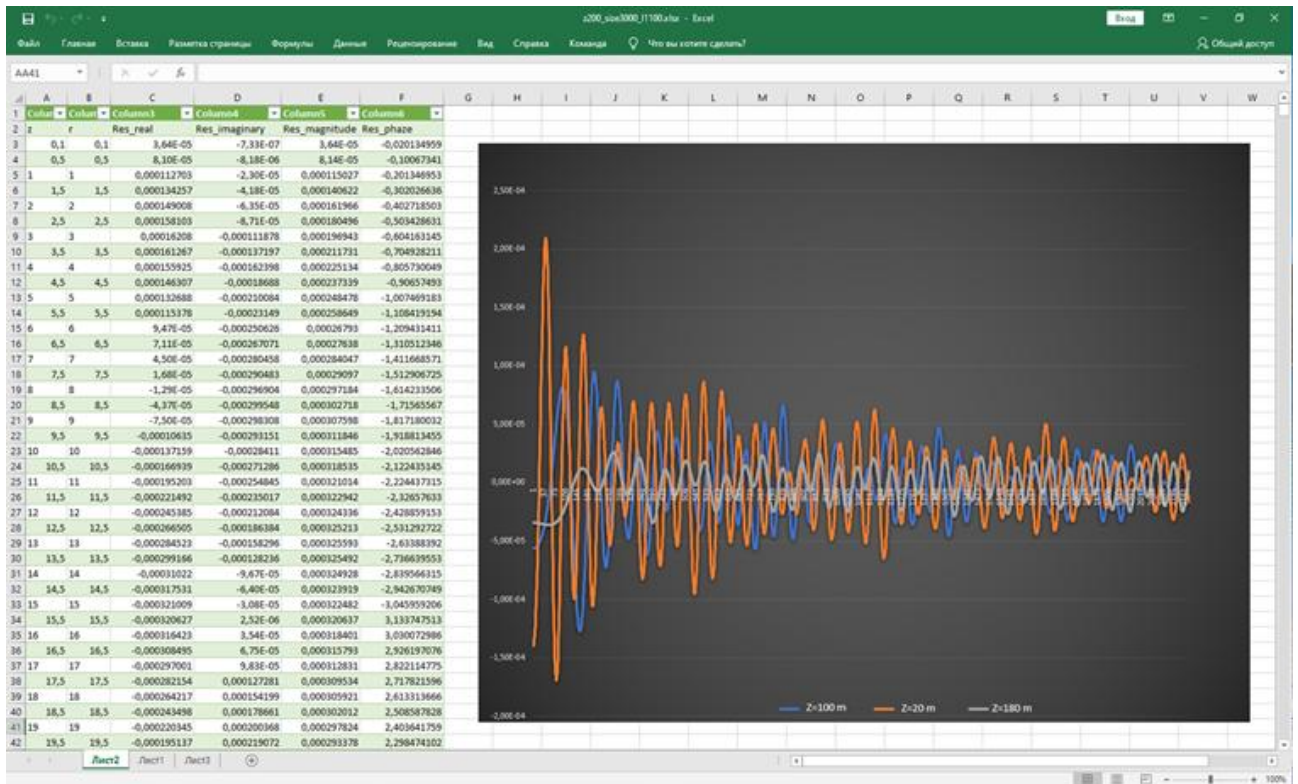


Рисунок 4.12. Структура файлу з результатами обчислення.

Графік є лінійним, що відображає залежність значень від часу або просторових координат. Криві мають хвилеподібну форму, що вказує на осциляції або хвильові процеси. На графіку показано три лінії, кожна з яких має різний колір, що представляє результати для різних значень координати z : синя лінія: позначена як $Z=100$ m, відображає результати для глибини 100 метрів; помаранчева лінія: позначена як $Z=20$ m, показує результати для глибини 20 метрів; сіра лінія: позначена як $Z=180$ m, відображає результати для глибини 180 метрів.

Всі три лінії мають коливальні рухи, причому амплітуда коливань зменшується зі збільшенням значення по горизонтальній осі. Це вказує на поступове затухання хвильового процесу або зменшення амплітуди з часом або з відстанню.

Коливання синьої та помаранчевої ліній більш виражені на початку графіка, тоді як сіра лінія має менш виражені коливання.

Горизонтальна вісь (вісь X): представляє час, відстань або інший параметр, що змінюється під час моделювання. Конкретне значення не вказане на зображенні, але це важливий параметр для динаміки процесу.

Вертикальна вісь (вісь Y): відображає величини осциляцій (інтенсивність, амплітуду чи інший фізичний параметр, пов'язаний із хвильовим процесом). Значення осі Y коливаються між додатними та від'ємними значеннями, що характерно для хвильових процесів.

У нижній частині графіка знаходиться легенда, яка вказує на відповідність кожної кривої певній глибині (100 м, 20 м, 180 м). Це дозволяє порівнювати результати для різних значень глибини.

Ліворуч від графіка розташована таблиця з числовими даними, що містять кілька стовпців: Column 0 - Column 6 відображають дані реальної та уявної частини хвиль, величини та фази. Значення в таблиці використовуються для побудови графіка. Дані мають дрібні значення (на рівні 10^{-5}), що свідчить про високоточні розрахунки.

Графік відображає динаміку хвильових процесів на різних глибинах у водному середовищі. Коливання зменшуються зі збільшенням часу або відстані, що свідчить про затухання хвилі. Дані з таблиці використовуються для побудови графіка, а різні кольори кривих дозволяють аналізувати зміни параметрів хвилі на різних глибинах.

4.5. Підвищення ефективності програмного забезпечення

Основним для проведення експериментальних досліджень є обрахунок акустичного тиску за допомогою представлених моделей. Тестування проводилося для кількох методів з однаковими умовами середовища. Початково для задання сцени потрібно задати гідроакустичну станцію (ГАС), яка буде приймачем у експерименті: обрати вільний ГАС з бази даних, задати його координати, глибину занурення, а також розмір та нахил середовища експерименту (рис. 4.13). У базі даних комплексу зберігаються моделі існуючих гідроакустичних станцій, а також їхні основні параметри, необхідні для моделювання гідроакустичного середовища, такі як: тип та серійний номер, фізичні параметри. Також програмне забезпечення дозволяє визначити координати і глибину розташування об'єкту, та зберігати ці вхідні значення для використання в майбутніх експериментах.

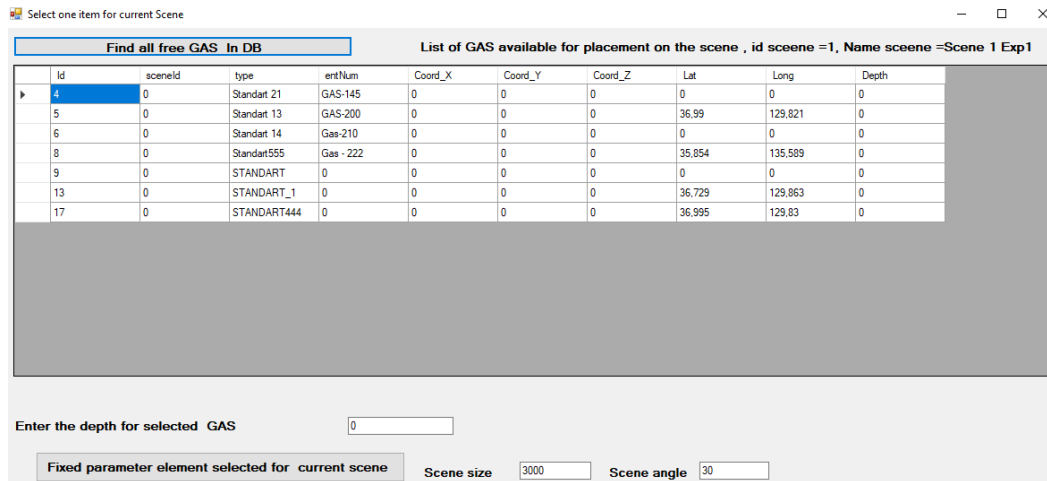


Рисунок 4.13. Вибір ГАС та задання його параметрів

Корабель, розповсюдження звуку від якого буде відслідковуватись, також не змінюється, як і його траєкторія. Аналогічно до ГАС, для експерименту задається корабель, його координати, глибина занурення, габарити, а також пересування (рис. 4.14).

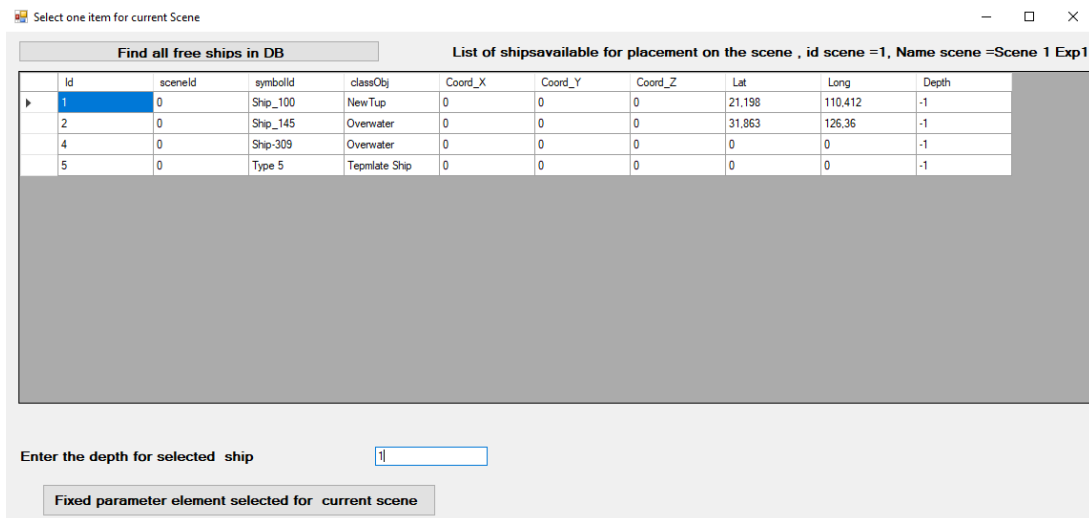


Рисунок 4.14. Вибір доступного корабля та задання його параметрів.

Як і у випадку з гідроакустичними станціями, в програмний комплекс зберігає існуючі моделі реальних об'єктів, які містять необхідні для обчислень параметри: їхні розміри, координати та глибину занурення. Програмний комплекс дозволяє зберігати задані координати та глибину занурення для відтворення експериментів, а також швидкого налаштування сцени експерименту для проведення обрахунків.

Створення нових моделей кораблів та гідроакустичних станцій здійснюється через спеціальне окреме програмне забезпечення, щоб уникнути випадкового затирання або змінення даних, а також забезпечення достовірності представлених варіантів.

Після задання необхідних параметрів середовища, для тестування ефективності створеного програмного забезпечення проводились на ноутбучі моделі Dell XPS 9500, оснащений процесором Intel Core i7-10750H із тактовою частотою 2.60 ГГц, що забезпечує високу продуктивність для обчислювальних задач. Оперативна пам'ять обсягом 32 ГБ гарантує швидку роботу в багатозадачному режимі та ефективну обробку ресурсомістких застосунків. Пристрій працює на 64-розрядній операційній системі з архітектурою x64, що забезпечує сумісність із сучасним програмним забезпеченням. Він працює під керуванням Windows 11 Pro версії 24H2, зі збіркою ОС 26100.3194 та пакетом інтерфейсу функцій Windows 1000.26100.48.0, що забезпечує сучасний інтерфейс і підтримку новітніх функцій.

Для фіксування часу використовувалась бібліотека System.Diagnostics, зокрема клас Stopwatch. Для запуску спостереження викликається метод класу Stopwatch::start(), для зупинки відповідно – Stopwatch::Stop(). Щоб отримати результат замірів, викликається метод Stopwatch::Elapsed, який повертає структуру TimeSpan, де у мілісекундах зберігається результат заміру.

Для проведення першого експерименту, обрахунки для кожного методу запускались для різної кількості мод – від 2 до 7 – , щоб прослідкувати зростання часу обробки з ускладненням обрахунків. У таблиці 4.5.1 представлені результати замірів.

Як можна простежити з результатів заміру, найбільш ефективною реалізацією є метод нормальних мод, реалізований з використання паралельних обчислень для коефіцієнтів, необхідних для обчислення. А ось найдовший час обчислень займає метод обрахування через потенціал амплітуди швидкості. Для наглядності результатів був побудований графік (рис. 4.5.4) використовуючи дані у таблиці 4.5.1.

Таблиця 4.1. Результати вимірювання часу обрахунку реалізованих методів.

Кількість мод	MethodSonicField	MethodSonicFieldModified	AmplitudeSpeedPotential	Haliorkins
2	406,691	302,298	14341,86084	1160,1864
3	531,362	320,063	18738,35383	1515,8411
4	654,066	501,443	23065,48104	1865,8846
5	815,604	574,161	28762,07997	2326,7115
6	931,5381	778,776	32850,46828	2657,4421
7	1069,667	753,0151	37721,5509	3051,4889

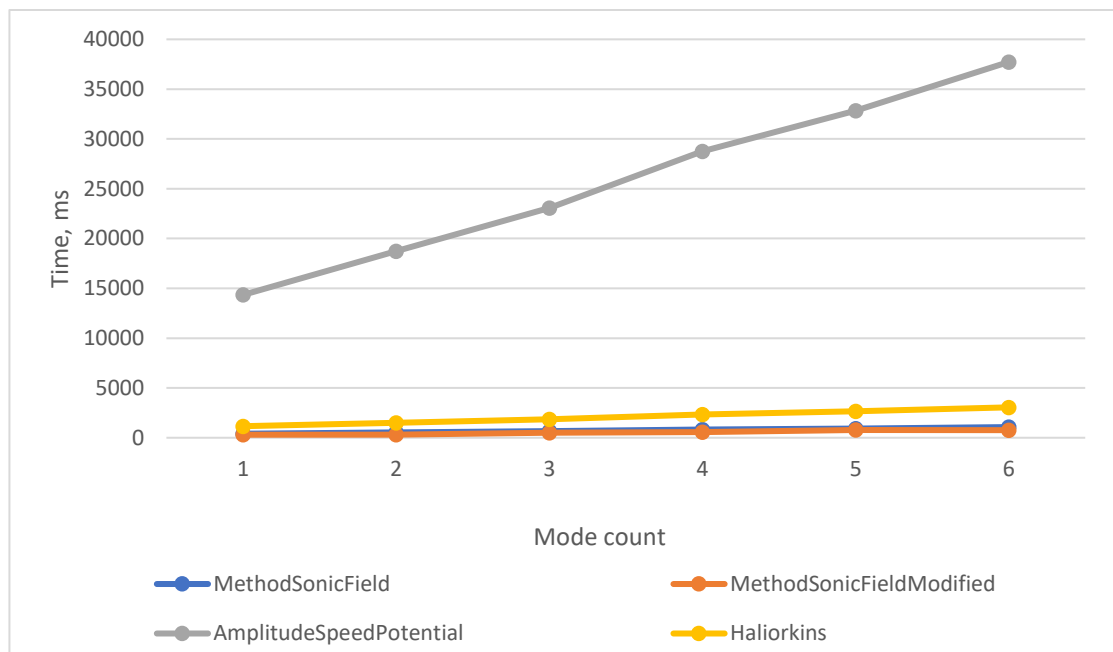


Рисунок 4.15. Порівняння замірів швидкості в обрахування усіх реалізованих у комплексі методів моделювання.

Зокрема в отриманих результатах, найцікавішим є порівняння методів MethodSonicField та MethodSonicFieldModified, оскільки дані методи реалізують один і той самий алгоритм обчислення, проте у другому методі (MethodSonicFieldModified) обчислення коефіцієнтів для кожної моди за використанням паралельних обрахунків, враховуючи закон Амдала (величина

прискорення виконання роботи за допомогою паралельних обчислень на різних процесорах обмежується часом обробки послідовних частин).

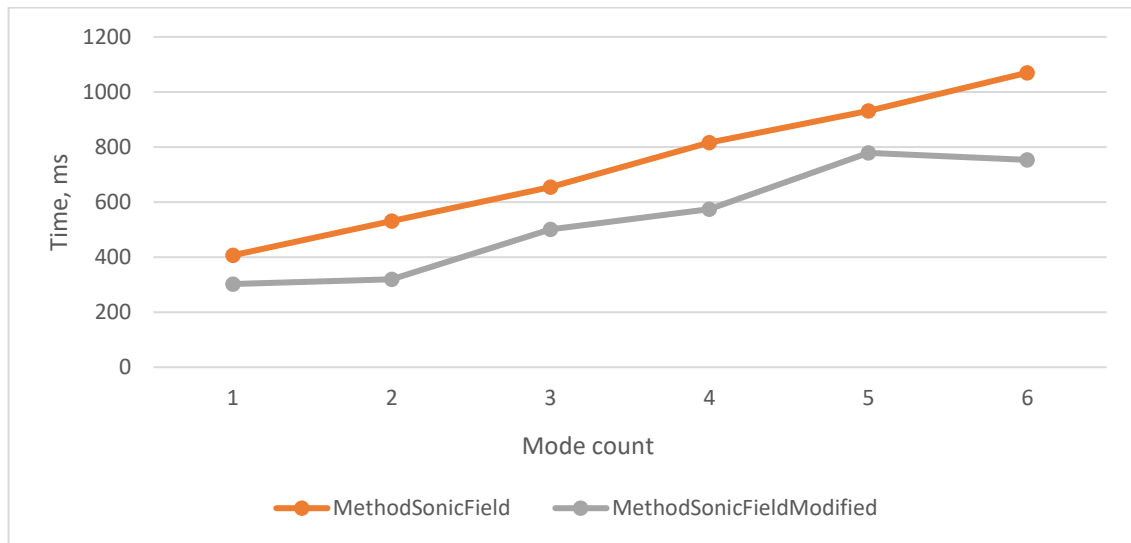


Рисунок 4.16. Порівняння замірів швидкості обрахування реалізацій методу нормальних мод.

Для зручності порівняння реалізацій методу нормальних мод було виведено заміри часу їх обрахунку на окремий графік (рис. 4.16). Як видно з результатів, за допомогою розпаралелення розрахунків вдалось прискорити обрахунки близько на 30%. Також було проведено аналіз впливу вибору методу задання зміни швидкості з глибиною на швидкість обрахунків кожного з представлених методів. Результати замірів представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Результати вимірювання часу обрахунку різних методів з різним заданням швидкості зміни швидкості звуку з глибиною.

Спосіб задання зміни швидкості звук	MethodSonicFieldModified	AmplitudeSpeedPotential	Haliorkins
Гіперболічна	32179,9426	33844,8641	2692,8229
Неперервна, постійна	7425,5225	33798,8956	2683,0153

Лінійна (змінні зовнішні умови)	2703,33	34754,9932	2740,3572
Експоненціальна	16241,2115	34199,4453	2700,767
Похили сходи	9163,6282	35662,7408	2818,2593

Для зручності, побудуємо графік на основі таблиці 4.2. Графік результатів зображено на рисунку 4.17.

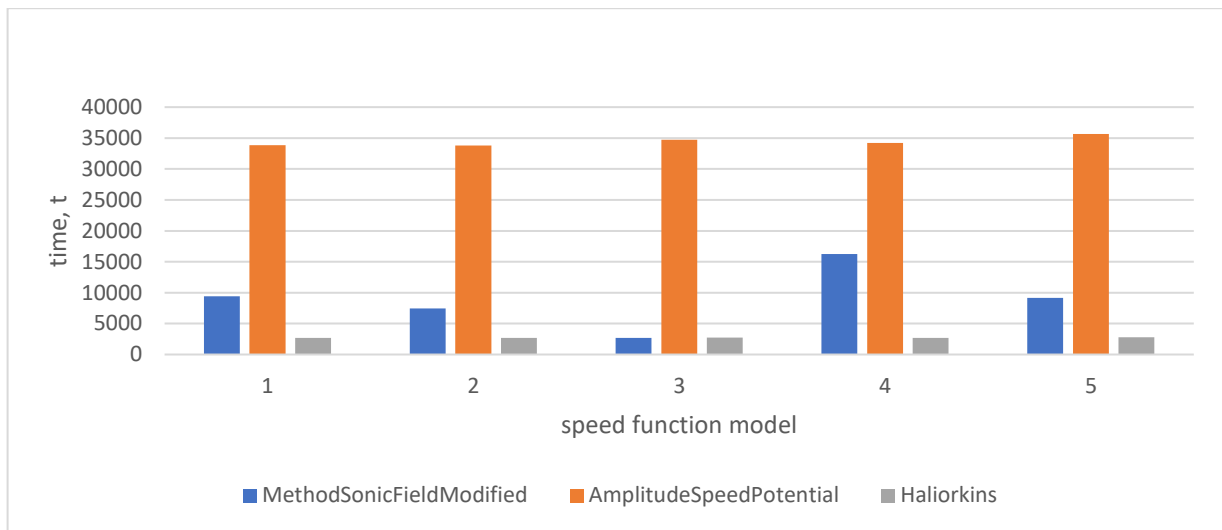


Рисунок 4.17. Демонстрація впливу обраного задання функції зміни швидкості з глибиною на реалізовані методи моделювання.

Як видно з графіку, найменше на швидкість виконання методів впливає лінійне задання, проте такий спосіб не відображає реальну картину зміни швидкості, проте дозволяє провести швидкі обчислення.

Основними методами, які ефективність роботи, яких потрібно протестувати, є удосконалення методу нормальних мод з послідовним обрахунком коефіцієнтів та реалізація методу нормальних мод з розділенням розрахунків коефіцієнтів для паралельного обчислення на різних ядрах процесору одночасно. Тому була проведена окрема серія тестів з цими двома методами, задаючи зміну швидкості звуку з глибиною різними способами. Результати цього тесту зображені в таблиці 4.3, з якої можна зробити висновок, що найшвидше відпрацював метод нормальних мод з розпаралеленням при заданні зміни швидкості звуку з глибиною лінійною функцією,

проте такий спосіб задання дає найменшу точність з усіх обраних. Тому, щоб не втрачати точність, також отримати максимально швидкий спосіб задання варто використовувати метод задання похилими сходами.

Таблиця 4.3. Результати вимірювання часу обрахунку реалізації удосконалених методів нормальних мод з заданням функції зміни швидкості звуку з глибиною.

Спосіб задання зміни швидкості звуку	MethodSonicField	MethodSonicFieldModified
Гіперболічна	32179,9426	33844,8641
Неперервна, постійна	7425,5225	33798,8956
Лінійна (змінні зовнішні умови)	2703,33	34754,9932
Експоненціальна	16241,2115	34199,4453
Похилі сходи	9163,6282	35662,7408

З метою демонстрації результатів замірів, на основі таблиці 4.3 створено графік на рисунку 4.18. . Як видно з графіку, не залежно від типу функції, яка задаватиме зміну швидкості звуку з глибиною, удосконалення методу нормальних мод, який використовує паралельні розрахунки на кількох ядрах процесору, швидший за удосконалення методу, де обчислення виконуються послідовно.

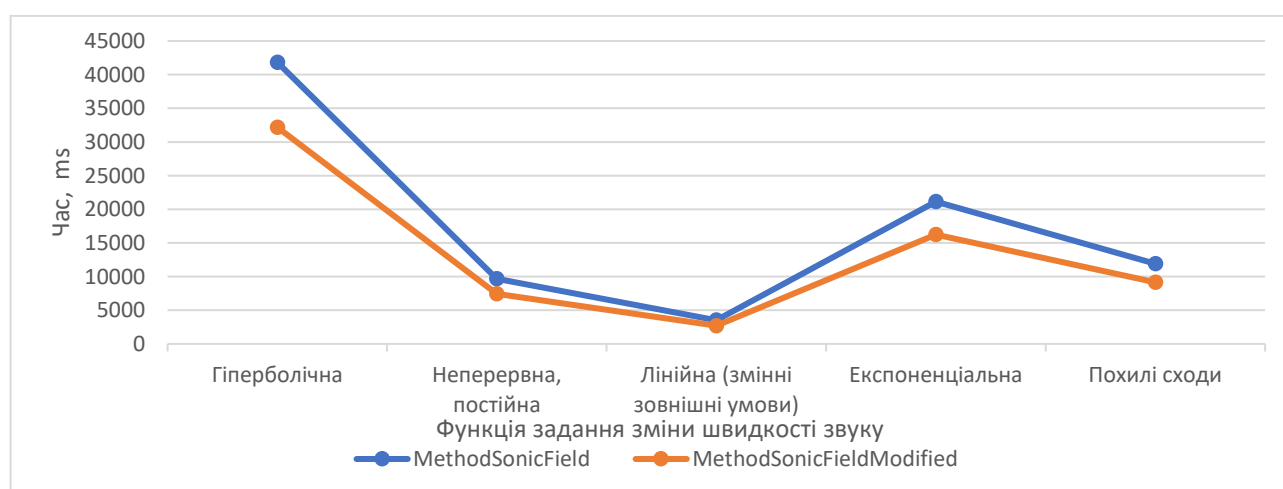


Рисунок 4.18. Порівняння швидкості обчислення удосконалених методів нормальних мод з різною функцією задання зміни швидкості звуку з глибиною.

Також для оцінки стабільності роботи програмного забезпечення, проведемо тестування методу нормальних мод з розпаралеленням при однакових вхідних параметрах. Результати замірів продемонстровано в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Результати обрахування кількох запусків удосконаленого методу з однаковими параметрами.

Кількість мод	1й запуск	2й запуск	3й запуск	4й запуск	5й запуск
2	302,298	308,34396	272,0682	305,32098	303,618
3	320,063	329,66489	288,0567	323,26363	321,383
4	501,443	506,45743	451,2987	506,45743	502,763
5	574,161	591,38583	516,7449	579,90261	575,481
6	778,776	794,35152	700,8984	786,56376	780,096
7	753,0151	760,545251	677,71359	760,545251	754,3351

Для зручності, побудуємо графік, використовуючи дані з таблиці 4.4: на рисунку представлений графік порівняння.

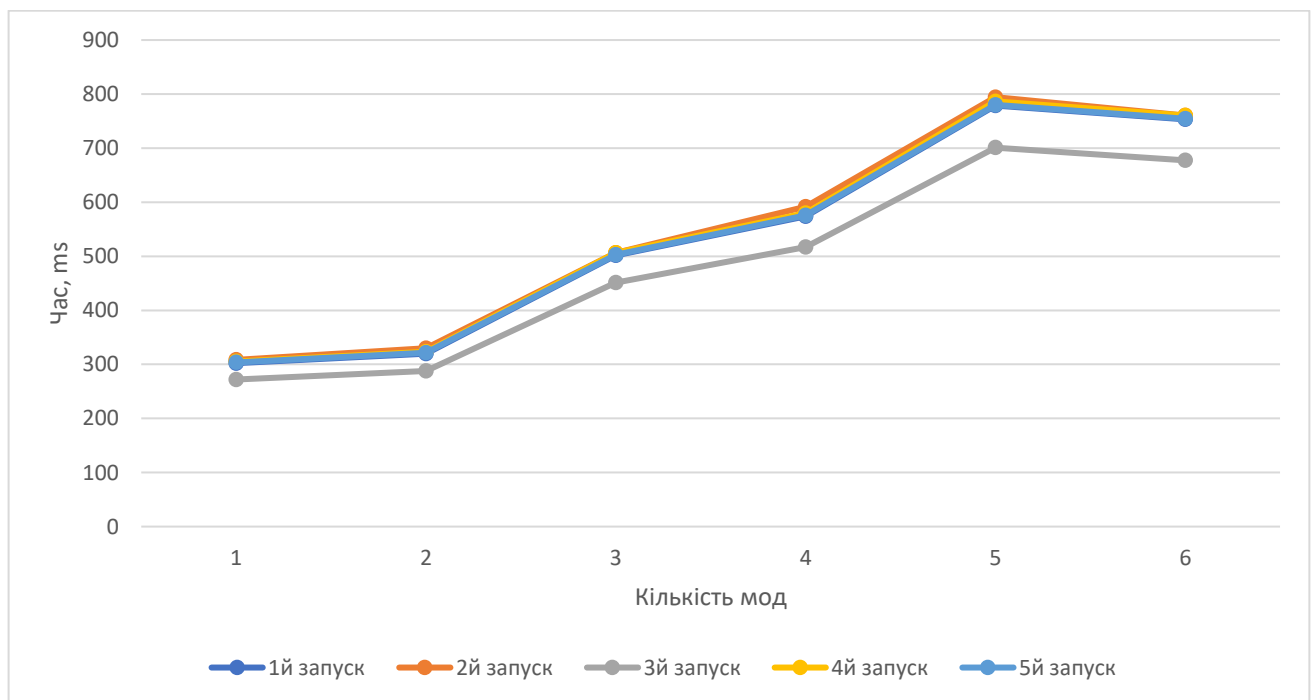


Рисунок 4.19. Порівняння кількох запусків удосконаленого методу з однаковими параметрами.

Як наглядно показує рисунок, при однакових умовах запуску, удосконалений метод нормальних мод показує майже стабільну швидкість обрахувань, з можливістю різниці приблизно від 1 до 10%, що є гарним показником стабільності функції.

4.6. Висновки до розділу 4

Розроблено архітектуру програмної реалізації моделювання гідроакустичного поля за використання удосконаленого методу нормальних мод на основі представленого модельно – орієнтованого семантичного підходу.

Розроблено програмне забезпечення, яке надає можливість проведення моделювання експериментів, з можливістю задання різноманітних характеристик середовища та розрахункових моделей для дослідження розповсюдження гідроакустичних сигналів. Впровадження зазначеного програмного забезпечення дозволяє підвищити ефективність виконання обрахунків та демонстрації результатів.

Проведено аналіз ефективності запропонованих методів моделювання гідроакустичних сигналів, який показав, що, відповідно до отриманих експериментальних даних, розроблений метод з використання паралельних розрахунків зменшує час обрахунку методом нормальних мод на 30%. Це надає можливість стверджувати, що ефективність моделювання гідроакустичних сигналів методом нормальних мод підвищується.

ВИСНОВКИ

1. На основі виконаного аналізу існуючих методів та моделей моделювання гідроакустичних сигналів методом нормальних мод на сьогоднішній день в теорії та практиці гідроакустики загострилося протиріччя між необхідністю точного та ефективного моделювання поширення гідроакустичних хвиль у складних морських середовищах та можливостями існуючих методів забезпечити адекватне врахування всіх фізичних особливостей середовища. В наукових працях основну увагу приділяють задачам математичного опису поширення гідроакустичних хвиль та чисельним методам розв'язання рівнянь акустики. Проте в цих дослідженнях недостатньо відображені питання адаптації моделей до реальних умов морського середовища, зокрема, до врахування нерівностей дна, просторової неоднорідності та динамічних змін гідрофізичних параметрів. Відсутність ефективних методів калібрування моделей за експериментальними даними, а також обмежені можливості існуючих моделей щодо відображення складних багатошарових середовищ не дозволяють забезпечити високу точність прогнозування поширення гідроакустичних сигналів. Недосконалість та неповнота наукових підходів до моделювання методом нормальних мод ускладнює застосування цих моделей для розв'язання практичних задач гідроакустики, таких як підводна навігація, виявлення та ідентифікація об'єктів. Тому сформульована в дослідженні наукова задача вдосконалення методів моделювання гідроакустичних сигналів методом нормальних мод є актуальною і спрямована на підвищення точності та ефективності прогнозування поширення акустичних хвиль у складних морських середовищах.

2. Удосконалено класичний метод нормальних мод для моделювання гідроакустичного сигналу, який відрізняється від існуючих введенням різних залежностей швидкості звуку для врахування особливостей водного середовища та додаванням часової змінної. Дане удосконалення методу дозволяє врахувати зміни акустичного тиску з часом при моделюванні розповсюдження звуку у водному середовищі.

3. Вперше розроблено узагальнений метод нормальних мод на основі врахування змінної швидкості звуку, часової змінної та введення вагових коефіцієнтів за допомогою поліному Чебишова. Зазначений метод дозволяє враховувати як лінійні, та і нелінійні випадки залежно від водного середовища.

4. Розроблено архітектуру програмної реалізації моделювання гідроакустичного поля за використання удосконаленого методу нормальних мод на основі представленого модельно – орієнтованого семантичного підходу.

5. Вперше розроблено програмне забезпечення комплексної системи моделювання гідроакустичних сигналів на основі запропонованих удосконаленого методу. Зокрема в реалізації було запропоновано спосіб спрощення та пришвидшення обрахунків за використанням паралельних обчислень за законом Амдала. Впровадження зазначеного програмного забезпечення дозволяє з більшою точністю та швидкістю отримати результати моделювання розповсюдження звуку у водному середовищі.

6. Проведено аналіз ефективності запропонованих методів моделювання гідроакустичних сигналів. Аналіз показав, що, за результатами моделювання розповсюдження гідроакустичного сигналу в морському середовищі, розроблений узагальнений метод дозволяє зменшити час обрахунку в середньому на 30 % без погіршення точності отриманих результатів. Це надає можливість стверджувати, що ефективність моделювання гідроакустичних сигналів методом нормальних мод підвищується.

7. Результати досліджень прийняті до впровадження в Конструкторському бюро «Шторм» КПІ ім. Ігоря Сікорського (акт від 26.02.2025 р.), в навчальний процес кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисципліни «Інженерія даних та знань» для студентів освітнього рівня «Магістр» спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» денної та заочної форми навчання (акт від 27.02.2025 р.).

8. Мета досліджень щодо підвищенні ефективності методів та програмного забезпечення моделювання сигналу дальнього поля на основі введення вагових

коефіцієнтів в методі нормальних мод для врахування нелінійності моделі морського середовища досягнута і усі поставлені наукові часткові завдання вирішені повністю. Отримані наукові результати дисертаційних досліджень є внеском в розвиток інформаційних технологій для системного аналізу, дослідження, розроблення архітектури та методів побудови багаторівневих комп'ютерних систем моделювання гідроакустичних явищ, зокрема комерційного призначення.

9. Перспективними шляхами досліджень є розроблення нових і удосконалення існуючих моделей та методів підвищення ефективності моделювання гідроакустичних явищ, зокрема розширення врахованих факторів, які можуть впливати на обрахунок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brillouin, L. (1960). Wave Propagation and Group Velocity. Academic Press, 166.
Available at: <https://www.elsevier.com/books/wave-propagation-andgroup-velocity/brillouin/978-1-4832-3068-9>
2. Brekhovskikh, L. (1976). Waves in Layered Media. Academic Press, 520.
Available at: <https://www.elsevier.com/books/waves-in-layered-media/brekhovskikh/978-0-12-130560-4>
3. Mann, J. A., Tichy, J., Romano, A. J. (1987). Instantaneous and time- averaged energy transfer in acoustic fields. The Journal of the Acoustical Society of America, 82 (1), 17–30. doi: <http://doi.org/10.1121/1.395562>
4. Mobarakeh, P. S., Grinchenko, V. T., Popov, V. V., Soltannia, B., Zrazhevsky, G. M. (2020). Contemporary Methods for the Numerical-Analytic Solution of Boundary-Value Problems in Noncanonical Domains. Journal of Mathematical Sciences, 247 (1), 88–107. doi: <http://doi.org/10.1007/s10958-020-04791-4>
5. Korzhyk, O., Naida, S., Kurdiuk, S., Nizhynska, V., Korzhyk, M., Naida, A. (2021). Use of the pass-through method to solve sound radiation problems of a spherical electro-elastic source of zero order. EUREKA: Physics and Engineering, 5, 133–146. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001292>
6. Mobarakeh, P. S., Grinchenko, V. T. (2015). Construction Method of Analytical Solutions to the Mathematical Physics Boundary Problems for NonCanonical Domains. Reports on Mathematical Physics, 75 (3), 417–434. doi: [http://doi.org/10.1016/s0034-4877\(15\)30014-8](http://doi.org/10.1016/s0034-4877(15)30014-8)
7. Kazak, M. S., Petrov, P. S. (2020). On Adiabatic Sound Propagation in a Shallow Sea with a Circular Underwater Canyon. Acoustical Physics, 66 (6), 616– 623. doi: <http://doi.org/10.1134/s1063771020060044>
8. Дюбченко, М. Е. (1984). Влияние осесимметричных мод колебаний на чувствительность и характеристики направленности пьезокерамической For reading only сферы. Акустический журнал, 30 (4), 477–481. Available at: http://www.akzh.ru/pdf/1984_4_477-481.pdf

9. Leiko, O., Derepa, A., Pozdniakova, O., Starovoit, Y. (2018). Acoustic fields of circular cylindrical hydroacoustic systems with a screen formed from cylindrical piezoceramic radiators. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, 15 (1), 41–46. Available at: <http://rjav.sra.ro/index.php/rjav/article/view/49>
10. Aronov, B. (2009). Coupled vibration analysis of the thin-walled cylindrical piezoelectric ceramic transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125 (2), 803–818. doi: <http://doi.org/10.1121/1.3056560>
11. Papkova J. I., Papkov S. O., Yaroshenko A. A. . Energy characteristics of the hydroacoustic field in a nonuniform marine medium with a cylindrical body floating on the surface // *Physical Oceanography — Springer Science + Business Media*, 2006. — Vol. 16, no.3. — pp. 168 -176
12. Папкина Ю.И. Метод нормальных мод для трехмерной модели гидроакустического волновода // *Динамические системы*. 2013. №3-4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-normalnyh-mod-dlya-trehmernoj-modeli-gidroakusticheskogo-volnovoda> (дата обращения: 13.07.2022).
13. Jensen, F.B.; Kuperman, W.A.; Porter, M.B.; Schmidt, H. *Computational Ocean Acoustics*; Springer: New York, NY, USA, 2011.
14. Grinchenko V. T. Fundamentals of Acoustics: Textbook / V. T. Grinchenko, I. V. Vovk, V. T. Matsypura - Kyiv: Naukova Dumka, 2007. - 640 p..
15. Etter Paul C. Underwater Acoustic Modeling and Simulation. New York : CRC Press, 2013.
16. Gorban I. I. Processing of hydroacoustic signals in complex dynamic conditions / I. I. Gorban - Kyiv: Naukova Dumka, 2008. - 276 p.
17. Gladkiy, A. V., & Podlasov, E. S. (2006). On automation of calculations of acoustic fields in inhomogeneous waveguides. *Mathematical Machines and Systems*, 1 (2), 107-117.
18. Yaroshenko A.A. Comparative analysis of methods for calculating shallow sea fields. Collection of scientific papers of Sevastopol NTU. Sevastopol, 2012, 2(42).
19. Blevins, Robert D. Formulas for natural frequency and mode shape (Reprint ed.). Malabar, Florida: Krieger Pub, 2001. ISBN 978-1575241845.
20. Tzou, H.S.; Bergman, L.A., eds. Dynamics and Control of Distributed Systems,

Cambridge University Press. England, 2008 ISBN 978-0521033749.

21. Shearer, Peter M. Introduction to seismology (2nd ed.), Cambridge University Press, England, 2009 pp. 231–237. ISBN 9780521882101

22. Debye P. Polar molecules, Moscow-Leningrad: GNTI, 1931. 247 p.

23. Sobolev S.L. Wave equation for an inhomogeneous medium / S.L.Sobolev. - Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1930. - 57 p. - (Proceedings of the Seismic Institute; N 6).

24. Rytov S. M. Modulated oscillations and waves // Proceedings of the Physical Institute of the USSR Academy of Sciences, 1940, v. 2, issue 1.

25. C. L. Pekeris; Asymptotic Solutions for the Normal Modes in the Theory of Microwave Propagation. *J. Appl. Phys.* 1 December 1946; 17 (12): 1108–1124. <https://doi.org/10.1063/1.1707683>

26. Bruyatsky E. V. Control volume method in computer fluid dynamics / E. V. Bruyatsky A. G. Kostin, E. I. Nikiforovich - Kyiv: Milenium, 2016.- 520 p.

27. Gottlieb, D.; Orszag, S.A. Numerical Analysis of Spectral Methods, Theory and Applications; Society for Industrial and Applied Mathematics: Philadelphia, PA, USA, 1977. <https://doi.org/10.1137/1.9781611970425>

28. Liao, S., Xiao, W. & Wang, Y. Dynamic hybrid parallel computing of the Ray Model for solving underwater acoustic fields in vast sea. *Sci Rep* 14, 25385 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76564-x>

29. Wang, L., Qin, J., Li, Z. and Liu, J. (2018) A Deep-Water Bottom Reverberation Model Based on Ray Theory. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 6, 2445-2452. <https://doi.org/10.4236/jamp.2018.611205>

30. Westwood, E.K., Tindle, C.T., Chapman, N.R. 1996. ‘A normal mode model for acousto-elastic ocean environments’. *Journal of the Acoustical Society of America* 100: 3631–3645.

31. Bonnel, Julien & Flamant, Julien & Dall'Osto, David & Le Bihan, Nicolas & Dahl, Peter. (2021). Polarization of ocean acoustic normal modes. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 150. 1897-1911. <https://doi.org/10.1121/10.0006108>.

32. Haug, Anton & Graves, Ronald & Überall, H.. (1975). Normal-mode theory of

underwater sound propagation from stationary multipole sources: Results for a realistic sound-speed profile. *Acoustical Society of America Journal*. 57. 1052-1061. <http://dx.doi.org/10.1121/1.380553>.

33. Graves, R. & Nagl, A. & Uberall, H. & Zarur, G. (1976). Normal mode theory of underwater sound propagation in a range dependent environment. 668- 670. <http://dx.doi.org/10.1109/ICASSP.1976.1169988>.

34. Lee D., Pierse A.D., Shang E.C. Parabolic equation development in the twentieth century // *J. Comput. Acoust.* - 2000. - Vol.1, N 4. - P. 527-637

35. Tappert, Fred. (2006). The Parabolic Approximation Method. 10.1007/3-540-08527-0_5.

36. Gilbert, K.; White, M. Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere. *J. Acoust. Soc. Am.* **1989**, 85, 630–637.

37. Gilbert, R.; Lee, S.W.; Kuester, E.; Chang, D.C.; Richards, W.F.; Gilbert, R.; Bong, N. A fast-field program for sound propagation in a layered atmosphere above an impedance ground. *J. Acoust. Soc. Am.* 1985, 77, 345.

38. Raspet, R. (2024). Understanding the fast-field program. <http://dx.doi.org/10.25144/19747>

39. Dinapoli, F. (1970). Fast Field Program. *Journal of The Acoustical Society of America - J ACOUST SOC AMER.* 47. <http://dx.doi.org/10.1121/1.1973765>.

40. Gilbert, Kenneth & Hansen, Scott. (1993). Finite element and finite difference models for the fast-field program in outdoor sound propagation. *Journal of The Acoustical Society of America - J ACOUST SOC AMER.* 94. <http://dx.doi.org/10.1121/1.408239>.

41. Lee D., McDaniel S.T. Ocean acoustic propagation by finite difference method // *Comput. Math. Appl.* - 1987. -Vol. 4. - P. 305-423.

42. Kalkowski, M.K., Muggleton, M.J., Rustighi, E. 2018 ‘Axisymmetric semi-analytical finite elements for modelling waves in buried/submerged fluid-filled waveguides’. *Computers and Structures* 196: 327-340. Kirby, R. 2008. ‘Modeling sound propagation in acoustic waveguides using a hybrid numerical method’. *Journal of the Acoustical Society of America* 124: 1930-1940.

43. Porter M. B. and Liu Y-C. Finite-Element Ray Tracing. In *Theoretical and*

Computational Acoustics, Vol. 2, World Scientific Publishing Co., 1994.

44. Porter, M.B. Scooter: A Finite Element FFP Code. 2010. Available online: https://oalib-acoustics.org/AcousticsToolbox/index_at.html (accessed on 2 June 2021).

45. J. Michael Jech, John K. Horne, Dezhang Chu, David A. Demer, David T. I. Francis, Natalia Gorska, Benjamin Jones, Andone C. Lavery, Timothy K. Stanton, Gavin J. Macaulay, D. Benjamin Reeder, Kouichi Sawada; Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research. J. Acoust. Soc. Am. 1 December 2015; 138 (6): 3742–3764. <https://doi.org/10.1121/1.4937607>

46. Brillouin, L. (1960). Wave Propagation and Group Velocity. Academic Press, 166. Available at: <https://www.elsevier.com/books/wave-propagation-andgroup-velocity/brillouin/978-1-4832-3068-9>

47. Canuto, C.; Hussaini, M.Y.; Quarteroni, A.; Zang, T.A. Spectral Methods Fundamentals in Single Domains; Springer: Berlin, Germany, 2006. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30726-6>

48. Porter M.B. and Bucker H.P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. J. Acoust. Soc. America, 82(4):1349–1359, 1987.

49. Northrop, John. (1974). SOFAR accuracy in the North Pacific. Journal of The Acoustical Society of America - J ACOUST SOC AMER. 55. 10.1121/1.1928150.

50. Brown, Michael & Smith, Kevin. (1990). Are SOFAR float trajectories chaotic?. Journal of Physical Oceanography - J PHYS OCEANOGR. 20. 139-149. 10.1175/1520-0485(1990)020<0139:ASFTC>2.0.CO;2.

51. Sean M. Reilly; 3D Gaussian ray bundling to improve the speed and accuracy of transmission loss eigenrays and multi-static reverberation, in littoral environments. J. Acoust. Soc. Am. 1 March 2023; 153 (3_supplement): A217. <https://doi.org/10.1121/10.0018706>

52. Reilly, Sean M., "WaveQ3D: Fast and Accurate Acoustic Transmission Loss (TL) Eigenrays, in Littoral Environments" (2016). Open Access Dissertations. Paper 441. https://digitalcommons.uri.edu/oa_diss/441

53. Reilly, Sean & Potty, Gopu. (2018). Improving the speed of acoustic propagation modeling, for sonar training applications, with a 3D Gaussian ray bundling model. The

Journal of the Acoustical Society of America. 144. 1791-1791.
<https://doi.org/10.1121/1.5067905>

54. Porter M. The KRAKEN normal mode program. SACLANT UNDERSEA RESEARCH (memorandum), San Bartolomeo, Italy, 1991.

55. Nuno M.R. Monteiro and Tiago C.A. Oliveira. 2023. Mesh generation for underwater acoustic modeling with KRAKEN. Adv. Eng. Softw. 180, C (Jun 2023).
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2023.103455>

56. Li, Binbin. (2020). Operability study of walk-to-work for floating wind turbine and service operation vessel in the time domain. Ocean Engineering. 220.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108397>.

57. Lalita, Rayi & Manik, Henry & Brojonegoro, Irsan. (2024). Underwater Acoustic Propagation using Monterey-Miami Parabolic Equation in Shallow Water Kayeli Bay Buru Distric. Journal of Applied Geospatial Information. 7. 1086-1091.
<https://doi.org/10.30871/jagi.v7i2.2802>.

58. Orlando Camargo Rodriguez, General description of the BELLHOP ray tracing program, Physics Department Signal Processing Laboratory Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade do Algarve, 2008, url: https://oalib-acoustics.org/website_resources/Rays/GeneralDescription.pdf

59. Brekhovskikh, L. (1976). Waves in Layered Media. Academic Press, 520. Available at: <https://www.elsevier.com/books/waves-in-layered-media/brekhovskikh/978-0-12-130560-4>

60. Kuperman, William & Roux, Philippe. (2007). Underwater Acoustics. Springer Handbook of Acoustics, ISBN 978-0-387-30446-5. Springer-Verlag New York, 2007, p. 149. -1. 149. 10.1007/978-0-387-30425-0_5. URL: https://www.researchgate.net/publication/234472513_Underwater_Acoustics

61. Kuperman W.A. and Lynch J.F. (2004) “Shallow-Water Acoustics”, Phys. Today 57: 55-61.].

62. Weinberg H. and Keenan R.E. Gaussian ray bundless for modeling highfrequency propagation loss under shallow-water conditions. J. Acoust. Soc. America, 100(3):1421–1431, September 1996.

63. Salomons, E.M. Computational Atmospheric Acoustics; Springer Science Business Media: Dordrecht, The Netherlands, 2001.
64. Yang, X. Computational Atmospheric Acoustics; Science Press: Beijing, China, 2015.
65. Pierce, A.D. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications; American Institute of Physics: New York, NY, USA, 1991.
66. Duan, W., Kirby, R. 2015. 'A numerical model for the scattering of elastic waves from a non-axisymmetric defect in a pipe'. Finite Elements in Analysis and Design 100: 28-40.
67. Butyrskiy, Evgeniy. (2022). Theoretical foundations of hydroacoustics and ocean acoustics. http://dx.doi.org/10.37468/book_171022.
68. B. -N. Kim, S. H. Kim, B. K. Choi, E. Kim and D. S. Kim, "Study of underwater sound propagation in the East China sea at spring 2015," *OCEANS 2017 - Aberdeen*, Aberdeen, UK, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084622.
69. Putra, I Wayan & Atmadipoera, Agus & Manik, Henry & Harsono, Gentio & Purwandana, Adi. (2024). Oceanographic Characteristics in the Three International Indonesian Archipelago Sea Lanes (IASLs) Region: Implications for Underwater Acoustics System. Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan. 10.20473/jipk.vi.56045.
70. Affatati, A., Scaini, C., & Salon, S. (2022). Ocean sound propagation in a changing climate: Global sound speed changes and identification of acoustic hotspots. *Earth's Future*, 10, e2021EF002099. <https://doi.org/10.1029/2021EF002099>
71. Jie, S.; Tao, T.; Lilian, W. Spectral Methods Algorithms, Analysis and Applications; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011.
72. Zhang, G., Ge, J., Cheng, S., Zhao, T., & Liu, S. (2023). Analysis of the Effect of Temperature on the Sound Transmission Loss of a Curved Plate. *Applied Sciences*, 13(16), 9116. <https://doi.org/10.3390/app13169116>
73. Mahdi, Zahraa S. & Al-Jumaily, Kais. (2012). ATMOSPHERIC EFFECTS ON SOUND WAVES PROPAGATION. Iraqi Journal of Science. 53. 689-692.

74. Pekeris, C.L. 1946. 'Theory of propagation of sound in a half-space of variable sound velocity under conditions of formation of a shadow zone'. *Journal of the Acoustical Society of America* 18: 295–315.
75. Bergmann, P.G. 1946. 'The wave equation in a medium with a variable index of refraction'. *Journal of the Acoustical Society of America* 17: 329-333.
76. Duan, W., Kirby, R., Mudge, P., Gan, T-H. 2016. 'A one dimensional numerical approach for computing the eigenmodes of elastic waves in buried pipelines'. *Journal of Sound and Vibration* 384: 177-193.
77. Duan, W., Kirby, R., Mudge, P. 2017. 'On the scattering of torsional waves from axisymmetric defects in buried pipelines.' *Journal of the Acoustical Society of America* 141: 3250-3261. Etter, P.C. 2013. *Underwater acoustic modelling and simulation*. 4th ed. London: CRC Press, Taylor and Francis Group.
78. Mobarakeh, P. S., Grinchenko, V. T., Popov, V. V., Soltannia, B., Zrazhevsky, G. M. (2020). Contemporary Methods for the Numerical-Analytic Solution of Boundary-Value Problems in Noncanonical Domains. *Journal of Mathematical Sciences*, 247 (1), 88–107. doi: <http://doi.org/10.1007/s10958-020-04791-4>
79. Kirby, R. Williams, P.T., Hill, J. 2014. 'A three dimensional investigation into the acoustic performance of dissipative splitter silencers'. *Journal of the Acoustical Society of America* 135: 2727-2737.
80. Affatati, A., Scaini, C., & Salon, S. (2022). Ocean sound propagation in a changing climate: Global sound speed changes and identification of acoustic hotspots. *Earth's Future*, 10, e2021EF002099. <https://doi.org/10.1029/2021EF002099>
81. Kirby, R., Duan, W., Karimi, M., Brennan, M., Kessissoglou, N. 2017 'Detecting sound waves generated by leaks in buried water distribution pipes'. *Proceedings of Acoustics 2017*, Perth, Australia.
82. Fahy F., Walker J. 1998. *Fundamentals of noise and vibration*. London: E & FN Spon
 Nguyen K.L, Treyssède F., Hazard C. 2015. 'Numerical modeling of three-dimensional open elastic waveguides combining semi-analytical finite element and perfectly matched layer methods'. *Journal of Sound and Vibration*: 344: 158 – 178.

83. Evans, R.B.; Di, X.; Gilbert, K.E. (Eds.) A Legendre-Galerkin Technique for Finding Atmospheric Acoustic Normal Modes; Acoustical Society of America: Boston, MA, USA, 2017; Volume 30.

84. Evans, R.B.; Di, X.; Gilbert, K.E. A Legendre-Galerkin spectral method for constructing atmospheric acoustic normal modes. *J. Acoust. Soc. Am.* 2018, 143, 3595–3601. <https://doi.org/10.1121/1.5040481>

85. Evans, R.B. The Convergence of the Legendre–Galerkin Spectral Method for Constructing Atmospheric Acoustic Normal Modes. *J. Theor. Comput. Acoust.* 2020, 28, 2050002. <https://doi.org/10.1142/S2591728520500024>

86. 48. Sabatini, R.; Cristini, P. A Multi-Domain Collocation Method for the Accurate Computation of Normal Modes in Open Oceanic and Atmospheric Waveguides. *Acta Acust. United Acust.* 2019, 105, 464–474. <https://doi.org/10.3813/AAA.919328>

87. Mann, J. A., Tichy, J., Romano, A. J. (1987). Instantaneous and time- averaged energy transfer in acoustic fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82 (1), 17–30. doi: <http://doi.org/10.1121/1.395562>

88. А.А. Ярошенко, О.Р. Ластовенко, В.А. Лисютин, «Вплив профілю швидкості звуку на поширення акустичних коливань в морському середовищі», «Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка», №1' 2007

89. Булгаков Н.П. Поле швидкості звуку та елементи його стратифікації в Атлантичному океані / Н.П.Булгаков, П.Д.Ломакін. - Севастополь: НАН України, Мор. гідрофіз. ін-т., 1997. - 272 с.

90. Дивізінюк М.М. Акустичні поля Чорного моря/М.М. Дивізінюк. - Севастополь: НДЦ «Державний океанаріум» МО України та НАН України, 1998. - 351 с.

91. Результаты эксперимента АCOUS/Л.М.Бреховських, А.Н.Гаврилов, В.В.Гончаров, С.В.Писарев, Ю.А.Чепурин, П.Н.Михалевський // Известия РАН. Фізика атмосфери та океану. - 2002. - Т. 38. - №6. - С. 726 - 737.

92. Богушевич В.К. Особливості впливу нижньої межі хвилеводу на кутову структуру звукового поля в шельфових районах Північно-Західної частини Чорного моря / В. К. Богушевич, Л. Н. Замаренова, М. І. Скіпа // Мор. гідрофіз. журн. -2003. -

№ 5. - C. 40 - 46.

93. Wang, Y.; Tu, H.; Liu, W.; Xiao, W.; Lan, Q. Two Chebyshev Spectral Methods for Solving Normal Modes in Atmospheric Acoustics. *Entropy* 2021, 23, 705. <https://doi.org/10.3390/e23060705>

94. Dzieciuch, M. A Matlab Code for Computing Normal Modes Based on Chebyshev Approximations. 1993. Available online: <https://oalib-acoustics.org/Modes/aw> (accessed on 2 June 2021).

95. Tu, H.; Wang, Y.; Liu, W.; Ma, X.; Xiao, W.; Lan, Q. A Chebyshev Spectral Method for Normal Mode and Parabolic Equation Models in Underwater Acoustics. *Math. Probl. Eng.* 2020, 2020, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2020/7461314>

96. Tu, H.; Wang, Y.; Lan, Q.; Liu, W.; Xiao, W.; Ma, S. A Chebyshev-Tau spectral method for normal modes of underwater sound propagation with a layered marine environment. *J. Sound Vib.* 2020, 2020, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115784>

97. Tu, H. A Chebyshev-Tau Spectral Method for Normal Modes of Underwater Sound Propagation with a Layered Marine Environment in Matlab and Fortran. 2021. Available online: <https://oalib-acoustics.org/Modes/NM-CT> (accessed on 2 June 2021).

98. Wang, Y.; Tu, H.; Liu, W.; Xiao, W.; Lan, Q. Application of Chebyshev collocation method to solve parabolic equation model of underwater acoustic propagation. *Acoust. Aust.* 2021, 2021, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s40857-021-00218-5>

99. Boyd, J.P. Chebyshev and Fourier Spectral Methods, 2nd ed.; Dover: New York, NY, USA, 2001.

100. The Basics of Model Driven Architecture, Cephas Consulting Corp. January 2006. URL: https://www.omg.org/mda/mda_files/Cephas_MDA_Fast_Guide.pdf

101. Cheng P., Lowe R., and Scaife M. Cognitive science approaches to understanding diagrammatic representations. *Artificial Intelligence Review*, 2001.

102. Novograduska R.L., Globa L.S., Koval O.V., Senchenko V.R. Ontology for Applications Development. Chapter 2. Ontology in Information Science; Book edited by Ciza Thomas. Print ISBN 978-953-51-3887-7. Published: March 8, 2018. P. 29–53. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/techopen.74042>

103. The Basics of Model Driven Architecture, Cephass Consulting Corp. January 2006. URL: https://www.omg.org/mda/mda_files/Cephass_MDA_Fast_Guide.pdf
104. Senchenko V.R., Koval A.V. The technology of semantic modeling for knowledge management system in environment Protege. «Информационные технологии и безопасность». Материалы XVII международной научно-практической конференции. Київ, 2017. Вип. 17. С. 211–234. 25.11.2017.
105. Marvin Minsky. A Framework for Representing Knowledge. URL: <http://web.media.mit.edu/~minsky/papers/Frames/frames.html>
106. Novograduska R.L., Globa L.S., Koval O.V., Senchenko V.R. Ontology for Applications Development. Chapter 2 «Ontology in Information Science»; book edited by Ciza Thomas. Print ISBN 978-953-51-3887-7. Published: March 8, 2018. P. 29–53. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74042>
107. Novograduska R.L., Globa L.S., Koval O.V., Senchenko V.R. Examples of Ontology Model Usage in Engineering Fields. Chapter 3 «Ontology in Information Science»; book edited by Ciza Thomas. Print ISBN 978-953-51-3887-7. Published: March 8, 2018. P. 54–81. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74369>
108. Juan Jose Bello-Tom´as, Pedro A. Gonz´alez-Calero, and Bel´en D´ıaz-Agudo Jcolibri. An Object-Oriented Framework for Building CBR Systems. URL: https://www.researchgate.net/publication/220831774_JColibri_An_Object-Oriented_Framework_for_Building_CBR_Systems
109. Semantic Web Schema 1.1. URL: <https://www.w3.org/TR/2002/WD-rdf-mt-20020429/>; <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/>
110. TopQuadrant Technology Briefing Semantic Technology. URL: <https://lists.oasis-open.org/archives/regrep-semantic/200402/pdf00000.pdf>
111. What is Semantic Technology? URL: <https://ontotext.com/knowledgehub/fundamentals/semantic-web-technology/>
112. Protege — Free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. URL: <http://protege.stanford.edu>
113. OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition) W3C Recommendation 11 December 2012: URL: <http://www.w3.org/TR/owl2-overview/>

114. Web Protege User Guide. URL: <http://protegewiki.stanford.edu/wiki/WebProtegeUsersGuide>
115. OWLGrEd Ontology Visualizer. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1268/paper7.pdf>
116. Novogradskaya R.L., Globa L.S., Koval O.V., Senchenko V.R. Ontology model of intelligent modeling system for marine facilities identification. Proceedings of International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 2017. DOI:10.1109/UkrMiCo.2017.8095426. IEEE Digital Library, 8095426 (scopus).
117. TODE: A Dot Net Based Tool for Ontology Development and Editing. in Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. (14–16 April 2010, Chengdu). Chengdu, China. 2010.
118. Web Ontology Language:URL: <http://www.w3.org/TR/owl-features/>
119. Practical Reasoning with OWL and DL–Safe Rules, P. Haase, P. Hitzler, M. Krötzsch, J. Angele: [URL:https://km.30.kit.edu/ws/prowl2006/prowl06_4on1.pdf](https://km.30.kit.edu/ws/prowl2006/prowl06_4on1.pdf)
120. Resource Description Framework Schema, RDF Schema 1.1. URL: http://www.w3.org/TR/rdf-schema/#ch_introduction
121. Web Protege User Guide. URL: <http://protegewiki.stanford.edu/wiki/WebProtegeUsersGuide>
122. An introduction to the owl web ontology language. URL: <http://www.cse.lehigh.edu/~heflin/IntroToOWL.pdf>

ДОДАТОК А

“ПОГОДЖЕНО”

Директор Навчально-наукового
Інституту атомної та теплової енергетики
Національно-технічного університету
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»



Свєтл ПИСЬМЕННИЙ

“ЗАТВЕРДЖЕНО”

Директор
Особливого конструкторського
біро «ШТОРМ»



Олександр КРАТКО

« _ » лютого 2025 року

АКТ

про реалізацію результатів дисертаційної роботи **ПИРОГОВСЬКОЇ Тетяни Володимирівни** на тему *«Методи та програмні засоби підвищення ефективності моделювання гідроакустичного сигналу на основі введення вагових коефіцієнтів»*

Результати наукових досліджень ПИРОГОВСЬКОЇ Тетяни Володимирівни, а саме розроблене спеціальне програмне забезпечення для моделювання гідроакустичних сигналів методом нормальних мод використано в науково-дослідницьких роботах та господарських договорах, що ведуться в Особливому конструкторському бюро «ШТОРМ» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Дане програмне забезпечення дозволяє моделювати гідроакустичне середовище та розповсюдження акустичного тиску у ньому використовуючи удосконалений метод нормальних мод.

На експериментальних даних було продемонстровано, що розроблене програмне забезпечення, яке реалізовує удосконалений метод нормальних мод, показало пришвидшення обчислень на 30%, за рахунок використання методів паралельних обчислень.

В.О. завідувача кафедри Інженерії
програмного забезпечення в енергетиці
д.т.н., професор

Олександр Коваль

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з навчальної роботи
КПІ ім.Ігоря Сікорського,
кандидат технічних наук, доцент



Тетяна ЖЕЛЯСКОВА

« 26 »

03

2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційних досліджень аспіранта кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці, навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Пироговської Тетяни Володимирівни за темою «Методи та програмні засоби підвищення ефективності моделювання гідроакустичного сигналу на основі введення вагових коефіцієнтів» на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення»

Отримані особисто Пироговською Тетяною Володимирівною, результати дисертаційних досліджень за темою «Методи та програмні засоби підвищення ефективності моделювання гідроакустичного сигналу на основі введення вагових коефіцієнтів», а саме: розробка онтологічної моделі гідроакустичного середовища, розробка онтологічної моделі програмного забезпечення, побудова інтерфейсу користувача на базі сценаріїв діяльності користувача та онтологічної моделі предметної області впроваджені в навчальний процес кафедри «Інженерії програмного забезпечення в енергетиці» у лекційні заняття та комп'ютерні практикуми навчальної дисципліни «Інженерія даних та знань» за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» за освітнім рівнем підготовки магістра (2024-2025):

Лекція 4: Онтологічна інженерія.

Лекція 5: Онтологічна інженерія (продовження).

Лекція 6: Розробка онтології за використанням програмної платформи Protege.

Лекція 7: Розробка онтології за використанням програмної платформи Protégé (продовження).

Лабораторна робота 3.

Лабораторна робота 4.

Зазначене актуалізує зміст навчальної дисципліни до потреб практики.

Директор навчально-наукового інституту
атомної та теплової енергетики,
доктор технічних наук, професор

В.о. завідувача кафедри інженерії програмного
забезпечення в енергетиці
доктор технічних наук, професор

Учений секретар кафедри інженерії програмного
забезпечення в енергетиці
доктор технічних наук, доцент



Євген ПИСЬМЕННИЙ

Олександр КОВАЛЬ



Андрій МУСІЄНКО

ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Свинчук О.В., Пуха Г.С., Євтушенко А.М., Пироговська Т.В. Моделювання розповсюдження гідроакустичного сигналу променевим методом. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2022. Т. 24, № 1. С. 36 – 50.

<https://doi.org/10.35681/1560-9189.2022.24.1.262745>

<http://drsp.ipri.kiev.ua/article/view/262745>

2. Пироговська Т., Довженко Т.П. Розробка користувацького інтерфейсу введення криволінійної траєкторії. Науково-практичний журнал «Зв'язок», 2023, № 4 (164). С. 39 – 45.

<https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.049000>

<https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/issue/view/168>

3. Пироговська Т., Євтушенко А. Структура бази знань моделювання гідроакустичних полів на основі променевої теорії. Науково-практичний журнал «Зв'язок», 2023, № 5 (165). С. 57 – 62.

<https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.055665>

<https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/issue/view/169>

4. О.В. Залевська, Г.С. Пуха, І.А. Варава, О.В. Коваль, Т.В. Пироговська, А.П. Мусієнко. Коефіцієнти Чебишева в моделюванні хвильового процесу методом нормальних мод. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2024. Т. 26 № 2. С. 10-18.

<https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.2.316706>

<http://drsp.ipri.kiev.ua/article/view/316706>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Відомості про апробацію результатів дисертації

5. Пироговська Т.В., Євтушенко А.М., Аналіз параметрів моделювання гідроакустичного поля променевим методом. Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення/Modern aspects of Software Engineering: II Міжнар. наук.-практ. конф.: наук. зб., – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024 р, с. 104-108.

6. Пироговська Т.В., Мусієнко А.П., Аналіз алгоритму пошуку траєкторії об'єкту у морському середовищі. III Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку», тези доповіді, 2023, м. Київ, с. 251-253.

7. Пироговська Т.В., Мусієнко А.П., Моделювання сигналу дальнього поля на основі використання коефіцієнтів Чебишева. Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення/Modern aspects of Software Engineering : II Міжнар. наук.-практ. конф.: наук. зб. (Київ, 13 листопада 2024 р.). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024 р., ст.13-15.

ДОДАТОК В

ЛІСТИНГ КОДУ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

Задання дефолтних розрахунків методу нормальних мод: кількості мод 7, глибини випромінювача 50м (за замовченням 100м)

```
public static Complex[] MethodSonicFieldModified(
double[] z,
double[] r,
Constants consts,
int modes = 7,
int speedType = 1,
double z0 = 0.1
)
```

Розрахунок значень коефіцієнтів та змінних, необхідних для розрахунку методом нормальних мод

```
public static readonly int[] SpeedSupportedTypes = new int[] { 0, 1, 2, 3, 4, 5 };
```

```
public static double DensityFunc(double z, double q) =>
    ((z / 10)) * Constants.atmoOne + q;
```

```
public static double SpeedFunc(double z = 0, int type = 0)
{
    switch (type)
    {
        case 0:
            {
```

```

        return 1500;
    };
case 1:
    {
        return 1510 + 30 * z / 100;
    }; break;
case 2:
    {
        return 0.4 * z + 1950;
    }; break;
//case -:
//    {
//        return 2000 - 50 * Math.Exp(-(z - 100) / 10);
//    }; break;
case 3:
    {
        if (z >= 0 && z <= 200)
        {
            if (z <= 20)
            {
                return 1520;
            }
            if (z <= 30)
            {
                return 1600 - 4 * z;
            }
            if (z <= 200)
            {
                return 1480;
            }
        }
    }

```

```

    if (z <= 500)
    {
        return 1490;
    }
    if (z <= 1000)
    {
        return 1500;
    }
    if (z <= 1500)
    {
        return 1550;
    }
    if (z <= 2000)
    {
        return 1600;
    }
}
return 1650;
}; break;
case 4:
{
    return 0.1 * z + 1480;
}; break;
default:
{
    return 1.0 / Math.Sqrt(Constants.a * z + Constants.b);
}; break;
}
return 1500;
}

```

```

public static Complex Calc_km(
    double w,
    double c,
    double m,
    double D,
    double zi = 1
)
{
    double a = w * w / c / c;
    double b = (m + 0.5) * (m + 0.5) * Math.PI * Math.PI / D / D;
    Complex kd = Complex.Sqrt(a - b);
    return kd;
}

```

```

public static double Calc_Phi(double z, double q) => z * z / q;

```

```

public static double Calc_kmax(double w, double z)
{
    int amount = 7;
    double[] k = new double[amount];
    for (int i = 0; i < amount; i++)
    {
        k[i] = SpeedFunc(z, i);
    }

    return w / k.Min();
}

```

```

public static double Calc_gm(double m, double h) => (m - 0.5) * Math.PI / h;

```

```
public static Complex Calc_gm_k(double w, double c, Complex k) =>
    Complex.Sqrt(w * w / c / c - k * k);
```

```
public static double Calc_gm_D(double m, double D) =>
    (m + 0.5) * Math.PI / D;
```

```
public static double CalcLevelM(double m, double M) => (M - m + 1) / M + 1;
```

```
public static Complex Calc_H(
    Complex km,
    double r,
    double level = 1
)
{
    Complex kmr = km * r;
    Complex root = Complex.Sqrt(2.0 / Math.PI / kmr);

    Complex exp = Complex.Exp(kmr - kmr * Math.PI * level - Math.PI / 4);
    Complex res = exp * root;

    return res;
}
```

```
public static Complex Calc_H1(
    Complex km,
    double r,
    double level = 1
)
{
```

```

Complex kmr = km * r;
Complex root = Complex.Sqrt(2.0 / Math.PI / kmr);

Complex exp = Complex.Exp(-(kmr - kmr * Math.PI * level - Math.PI / 4));
Complex res = exp * root;
return res;
}

public static Complex Calc_H_over_H1(
    Complex km,
    double r,
    double level = 1
)
{
    Complex kmr = km * r;
    Complex exp = Complex.Exp(kmr - kmr * Math.PI * level - Math.PI / 4);
    Complex exp1 = Complex.Exp(-(kmr - kmr * Math.PI * level - Math.PI / 4));
    return exp / exp1;
}

private static Complex Calc_J(Complex z, double v)
{
    Complex a = Complex.Sqrt(2.0 / Math.PI / z);
    Complex d = z - Math.PI * v / 2 - Math.PI / 4;
    Complex c = Complex.Cos(d);
    Complex s = Complex.Sin(d) * (v * v - 0.5 / 2 / z);
    return a * (c - s);
}

public static Complex CalcHv(Complex km, double r, double v = 0)

```



```

{
    Complex J = Calc_J(km * r, v);
    Complex Y = -Math.Sqrt(3) * J;
    return J + Complex.ImaginaryOne * Y;
}

```

```

public static Complex Calc_Phi_m(double z, double m, double h) =>
    z + Math.PI * (m - 0.5) / h;

```

```

public static Complex Calc_Phi_m_cos(double z, double m, double h) =>
    Math.Cos(z * Math.PI * (m - 0.5) / h);

```

```

public static Complex Calc_Phi_d_sin(double z, double m, double h) =>
    Math.Sin(z * Math.PI * (m + 0.5) / h);

```

```

public static double Calc_Miu(
    double z,
    double r,
    double c,
    KeyValuePair<double, double>[] qs
)
{
    if (qs.Length == 1) {
        return qs.First().Value;
    }

    int i = 1;
    while(z <= qs[i].Key && qs[i].Key != -1 && i < qs.Length)
    {

```

```

        i++;
    }

    double q1 = qs[i - 1].Value;
    double q2 = qs[i].Value;

    double kq = q2 / q1;

    double O1 = Math.Acos(z / Math.Sqrt(z * z + r * r));
    double O2 = -O1 * kq;

    double c1 = c;
    double c2 = c * kq;

    double cos1 = Math.Cos(O1);
    double cos2 = Math.Cos(O2);

    double a = q1 * c1 / cos1;
    double b = q2 * c2 / cos2;

    return (a - b) / (a + b);
}

```

Розрахунок методом нормальних мод

```

public static Complex[] MethodSonicField(
    double[] z,
    double[] r,
    Constants consts,
    int modes = 7,

```

```

int speedType = 1,
double z0 = 0.1
)
{
    Complex[] p = new Complex[z.Length];

    double[] rp = null;
    double[] zp = null;

    Parallel.For(0, z.Length, i =>
    {

        Complex kmx = Misc.Calc_km(consts.waveFreq, Misc.SpeedFunc(z[i], speedType),
1, consts.D);

        Complex[] Ks = new Complex[modes];
        Ks[0] = kmx;

        for (int j = 2; j <= modes; j++)
        {
            Ks[j - 1] = Misc.Calc_km(consts.waveFreq, Misc.SpeedFunc(z[i], speedType), j,
consts.D);
            if(Ks[j - 1].Magnitude > kmx.Magnitude)
            {
                kmx = Ks[j - 1];
            }
        }

        kmx = kmx * kmx;

```

```
Ks = Ks.Select(ki => kmx * kmx - ki * ki).ToArray();
```

```
Complex sum = 0;
```

```
for (int m = 1; m <= modes; m++)
```

```
{
```

```
    Complex kms = Misc.Calc_km(consts.waveFreq, Misc.SpeedFunc(z[i],  
speedType), m, consts.D);
```

```
    Complex H = Misc.Calc_H(kms, r[i], Misc.CalcLevelM(m, modes));
```

```
    var gm0 = Misc.Calc_gm_k(consts.waveFreq, Misc.SpeedFunc(z0, speedType),  
kms);
```

```
    sum += Complex.Sin(gm0 * z0) * Complex.Sin(gm0 * z[i]) * H;
```

```
}
```

```
var val = Complex.Sqrt(Complex.ImaginaryOne / 2 / consts.D) * sum;
```

```
p[i] = val;
```

```
}
```

```
);
```

```
return p;
```

```
}
```

Використання паралельних розрахунків методу нормальних мод з метою спрощення на основі закону Амдала

```
public static Complex MethodSonicFieldModifiedIter(double[] z, double[] r, double z0, int  
i, double waveFreq, int modes, int speedType, double q, double D, Complex[] kms)  
{
```

```

Complex sum = 0;
for (int m = 1; m <= modes; m++)
{
    Complex H = Misc.Calc_H(kms[m - 1], r[i], Misc.CalcLevelM(m, modes));
    var gm0 = Misc.Calc_gm_k(waveFreq, Misc.SpeedFunc(z0, speedType), kms[m -
1]);
    sum += Complex.Sin(gm0 * z0) * Complex.Sin(gm0 * z[i]) * H;
}
double qi = Misc.DensityFunc(z[i], q);
var val = Math.Sqrt(2 * qi / D) * sum;
return val;
}

```

```

public static Complex[] MethodSonicFieldModified(
    double[] z,
    double[] r,
    Constants consts,
    int modes = 7,
    int speedType = 1,
    double z0 = 0.1
)
{
    Complex[] p = new Complex[z.Length];
    Complex[] kms = new Complex[modes];
    double[] gms = new double[modes];

    Parallel.For(1, modes + 1, m =>
    {
        kms[m - 1] = Misc.Calc_km(consts.waveFreq, Misc.SpeedFunc(), m, consts.D);
        gms[m - 1] = Misc.Calc_gm(m, consts.h);
    }
    );
}

```

```
});
```

```
Parallel.For(0, z.Length, i => {
```

```
    p[i] = MethodSonicFieldModifiedIter(z, r, z0, i, consts.waveFreq, modes, speedType,
    consts.q, consts.D, kms);
```

```
});
```

```
return p;
```

```
}
```