

Національна академія наук України
Інститут гідромеханіки



ЛИСЕЧКО ВІКТОР ОЛЕГОВИЧ

УДК 534.26

**ДИФРАКЦІЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ
НА ФРАГМЕНТАХ КОНІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ**

01.04.06 – акустика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2016

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Куриляк Дозислав Богданович,
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
(м. Львів), завідувач відділу фізичних основ діагностики матеріалів

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Вовк Ігор Володимирович,
Інститут гідромеханіки НАН України (м. Київ), провідний науковий співробітник відділу гідродинамічної акустики

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Ловейкін Андрій Вячеславович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
доцент кафедри математичної фізики механіко-математичного факультету

Захист відбудеться “27” жовтня 2016 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.196.01 в Інституті гідромеханіки НАН України за адресою: вул. Желябова, 8/4, м. Київ, 03680.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту гідромеханіки НАН України.

Автореферат розісланий “26” вересня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.196.01
доктор технічних наук, професор



С. І. Кріль

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Усю сукупність елементів конічної форми можна умовно розділити на дві групи. До першої відносимо структури, які використовують для формування акустичного поля із наперед заданими властивостями. Це, наприклад, гідродинамічні антени, рупори та мікрофони, трансдюсери та перетворювачі акустичної енергії. Сюди також можна віднести різної конфігурації сферо-конічні резонатори. Механічні елементи конічної форми, такі як долота, штампи, підшипники, валки прокатних станів, а також різні конструкції – резервуари, труби змінного діаметру, сопла літальних апаратів – утворюють другий тип конічних поверхонь. Характеристики полів, розсіяних цими структурами, можуть використовуватись як інформативні параметри у неруйнівному контролі, щоб виявити пошкодження, які виникають при їх експлуатації. Крім того, фрагменти конічних поверхонь можна використовувати як моделі дефектів (тріщин, включень).

Для розширення функціональних можливостей конічних структур у різних галузях технічної фізики важливим є встановлення нових фізичних закономірностей взаємодії акустичних полів з такими поверхнями у широкому діапазоні зміни їх геометричних параметрів і частоти. Сучасні засоби теоретичного аналізу полів, розсіяних об'єктами складної форми, базуються на використанні прямих числових методів та (або) наближених асимптотичних підходів. Незважаючи на гнучкість цих підходів стосовно їх застосування до розсіювачів різної геометричної форми, вони володіють рядом недоліків, які принципово складно усунути. Використання прямих числових підходів вимагає значного ресурсу машинного часу, а отже суттєво ускладнює процеси дослідження. Це стосується випадків, коли необхідно проводити великі об'єми розрахунків, наприклад, при розв'язанні обернених задач або реалізації режиму реального часу в неруйнівному контролі. Крім того, при використанні прямих числових методів виникає проблема верифікації отриманих результатів. Це особливо стосується визначення полів в екстремальних ситуаціях – у ближній зоні, біля геометричних сингулярностей поверхні розсіювачів, а також в резонансній області і при переході до надвисоких частот. Стосовно використання асимптотичних методів, далеко не завжди наперед можна встановити їх область використання. Тому дуже важливо розвивати спеціалізовані строгі аналітико-числові методи для структур, які містять фрагменти канонічної форми. Розвиток таких підходів дозволить отримати розв'язки із заданою точністю в широкому частотному діапазоні, які можуть служити реперними для верифікації більш загальних методів, а їх висока швидкодія може бути використана для реалізації дослідження полів у реальному режимі часу. Оскільки фрагменти конічних поверхонь моделюють широкий клас технічних виробів, то розвиток строгих аналітико-числових підходів для вивчення взаємодії акустичних полів з такими розсіювачами є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана дисертаційна робота пов'язана з виконанням держбюджетних науково-дослідних робіт, що проводилися в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України у відділі фізичних основ діагностики матеріалів: “Вивчення властивостей хвильових полів у матеріалах з дефектами для розроблення методик діагностування і моніторингу відповідальних конструкцій” (2012-2014 рр., № держреєстрації 0112U002784).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є вивчення закономірностей формування акустичних полів (тисків, коливальних швидкостей) з гармонічною залежністю від часу, розсіяних фрагментами жорстких і м'яких кругових конічних поверхонь у ближній та дальній зонах при різних кутах опромінення плоскою акустичною хвилею.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі завдання:

- розв'язати задачі дифракції плоскої акустичної хвилі на ідеальних (жорсткому, м'якому) скінченному та напівнескінченному зі зрізаною вершиною конусах при осьовому опроміненні;
- розв'язати задачу дифракції плоскої акустичної хвилі на м'якому і жорсткому скінченних конусах при боковому опроміненні;
- встановити залежності характеристик дифрагованих полів від геометричних параметрів конічних розсіювачів і частоти у широкому діапазоні їх зміни за різних умов опромінення;
- вияснити вплив граничних значень імпедансу конічних поверхонь з краями шляхом порівняння їх дифракційних характеристик для м'яких і жорстких поверхонь;
- вияснити можливість діагностування геометричних параметрів конічних поверхонь з краями за даними зондування плоскою акустичною хвилею.

Об'єктом дослідження є явища взаємодії гармонічних акустичних хвиль із фрагментами конічних структур для двох різних типів поверхонь.

Предметом дослідження є вплив поверхні конуса, вершини, країв та кутів опромінення на розподіли поля у ближній та дальній зонах.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано метод розділення змінних, метод розкладу поля за власними функціями підобластей та метод спряження акустичних полів на межах підобластей. Ці методи застосовано для зведення задач теорії дифракції до систем суматорних рівнянь. Алгебраїзацію отриманих рівнянь проводили методом перерозкладу власних функцій суміжних підобластей і зводили дифракційну задачу до нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь (НСЛАР). Оскільки основна частина асимптотики матричних елементів НСЛАР утворює сингулярний оператор типу згортки, то для ефективного розв'язування дифракційної задачі використано процедуру аналітичної регуляризації, суть якої полягає у точному аналітичному оберненні сингулярної частини оператора. Це дозволило звести дифракційну задачу до НСЛАР другого роду, яка розв'язується методом редукції із заданою точністю.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що в роботі вперше:

- у строгій постановці розв'язані задачі дифракції плоскої акустичної хвилі на м'яких та жорстких конусах з круговими краями при довільному куті опромінення та геометричних параметрах розсіювачів;
- задачі зведено до НСЛАР другого роду методом аналітичної регуляризації, що базується на точному аналітичному оберненні сингулярних частин відповідних операторів;
- отримано НСЛАР другого роду для розв'язання задач дифракції на м'яких та жорстких кругових дисках за довільних кутів опромінення та апертурах при осе-

симетричному опроміненні; для цих задач запропоновано нові регуляризуючі оператори;

- вияснено фізичні закономірності формування акустичних полів фрагментами конічних поверхонь у широкому частотному діапазоні, включаючи резонансну область, перехідну та область геометричної акустики; у цих діапазонах встановлено залежності дифракційних характеристик м'яких і жорстких конусів від геометричних параметрів та кутів опромінення;
- виявлено ефекти: фокусування та запирання акустичних хвиль апертурою зрізаних конусів; низькочастотного резонансного розсіювання жорсткими скінченними конусами та м'якими конусами зі зрізаною вершиною; встановлено залежності основних дифракційних характеристик від кутів зондування скінченних конусів, а також домінуючий вплив поршневої моди на ближнє поле жорстких розсіювачів.

Практичне значення отриманих результатів. Розвинутий метод дозволяє створити швидкодіючі алгоритми для моделювання акустичних полів, розсіяних на м'яких та жорстких конічних поверхнях з круговими краями в режимі реального часу. Такі швидкодіючі алгоритми є важливими при розв'язанні обернених задач, зокрема, для знаходження оптимальних режимів випромінювання. Запропонований підхід дозволяє отримувати дифракційні характеристики конусів із заданою точністю для довільних значень геометричних параметрів, частоти та кута опромінення, а отже отримані результати можуть використовуватись як реперні для верифікації наближених підходів. Порівняння полів, розсіяних м'якими та жорсткими поверхнями однакової геометрії, дозволить оцінити вплив фізичних властивостей поверхонь на їх дифракційні характеристики. Отримані при різних кутах опромінення дифраговані поля на краях та вершинах конусів можна використати в якості початкових наближень у більш загальних підходах до аналізу складних комбінованих структур. Отримані поля, дифраговані на різних конічних структурах з краями, можуть бути використані для інтерпретації даних у неруйнівному контролі.

Особистий внесок здобувача. У статтях [1–5], написаних у співавторстві, внесок автора полягає у виведенні основних рівнянь, розробці алгоритмів, проведенні обчислень, верифікації отриманих результатів та прийнятті участі у формуванні висновків.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи за темою дисертації доповідалися та обговорювалися на вітчизняних і міжнародних конференціях:

- International Seminar/Workshop on “Direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic theory”, Lviv-Tbilisi (2014, 2015);
- 10-th International Skorobohatko Mathematical Conference, Drohobych, 2015;
- International Young Scientists Forum on Applied Physics, Dnipropetrovsk, 2015;
- Відкритій науковій конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів (2013, 2015);
- Міжнародній математичній конференції «Диференціальні рівняння, обчислювальна математика, теорія функцій та математичні методи механіки» до 100-річчя від дня народження члена-кореспондента НАН України Положого Георгія Миколайовича, Київ, 2014;

- Міжнародній науковій конференції імені академіка Михайла Кравчука, Київ (2014, 2015);
- 5-тій Міжнародній конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій», Львів, 2014;
- IX Міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур», Львів, 2014;
- III науково-технічній конференції «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації», Львів, 2014;
- Конференції молодих учених «Підстригачівські читання – 2015», Львів, 2015;
- III Міжнародній конференції «Сучасні проблеми механіки», Київ, 2015;
- Акустичному симпозіумі «КОНСОНАНС-2015», Київ, 2015.

Результати роботи також доповідалися на науковому семінарі відділу фізичних основ діагностики матеріалів та на семінарі “Проблеми технічної діагностики та дистанційного зондування” Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано у 20 наукових працях, з них 5 статей [1–5] у фахових спеціалізованих журналах та 15 публікацій і матеріалів доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях [6–20]. Стаття [5] індексується у наукометричних базах: Open Science Directory, SHERPA/RoMEO, Ulrich’s Periodicals Directory та ін.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п’яти розділів, висновку і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складається з 142 сторінок, з них 14 – займає список використаних літературних джерел (найменувань). Всього в дисертації 59 малюнків та 3 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, які необхідно було розв’язати для досягнення поставленої мети, відзначено практичну значимість отриманих результатів.

У **розділі 1** проведено огляд літературних джерел, де вивчалась дифракція хвиль на конічних поверхнях. Більшість із них стосуються вивчення дифракції акустичних та електромагнітних хвиль на напівнескінчених конусах і відображені у працях: Y.A. Antipov, S. Blume, B.D. Bonner, H.S. Carslaw, J. Cheeger, L.B. Felsen, L. Kraus, M. Taylor, F.M. Wiener, I.B. Андропова, В.М. Бабича, В.А. Боровикова, Д.Б. Дементьєва, В.О. Дорошенка, М.А. Лялінова, Б.Г. Ніколаєва, А.В. Шаніна та ін. Значно менша за обсягом кількість праць стосується вивчення дифракції хвиль на скінчених конусах. Тут, в основному використовуються високочастотні асимптотичні методи, що базуються на законах геометричної оптики (J.B. Keller), а також методах, які наближено враховують розсіяння хвиль краями, як-от геометрична теорія дифракції (Б.Е. Кінбер) та метод краєвих хвиль (П.Я. Уфимцев). Математично строгі підходи до аналізу полів, розсіяних скінченими конусами, з мінімальними обмеженнями на частотний діапазон розвинуті у працях І.В. Вовка, В.Т. Грінченка та Ю.В. Вайсleyба. Спеціалізовані методи для аналізу статичних задач взаємодії

пружних полів з конусами, які базуються на методі сингулярних інтегральних рівнянь, розглядалися у працях А.Ф. Улітка, Н.Д. Вайсфельд, Г.Я. Попова. Метод аналітичної регуляризації, який дозволив коректно врахувати особливості полів розсіяних краями скінченних конусів, розвинуто Д.Б. Куриляком і З.Т. Назарчуком. У цих працях авторами, в основному, досліджувались електромагнітні поля. Тому розвиток цих підходів для вивчення дифракції акустичних хвиль скінченними кінчними поверхнями є актуальною задачею, яка розв'язується у дисертаційній роботі.

У **розділі 2** розглянуто осесиметричну задачу дифракції плоскої акустичної хвилі $U^{(i)}(r, \theta) = \exp(ikr \cos \theta)$, що поширюється в напрямку $\theta = 0$, на скінченному м'якому (S -випадок) або жорсткому (R -випадок) порожнистому конусі, який у сферичній системі координат (r, θ, φ) записуємо так

$$Q_2 : \{r \in (0, c_2); \theta = \gamma; \varphi \in [0, 2\pi)\},$$

де c_2 , γ – відповідно довжина твірної та кут розхилу конуса (рис. 1, параметри a).

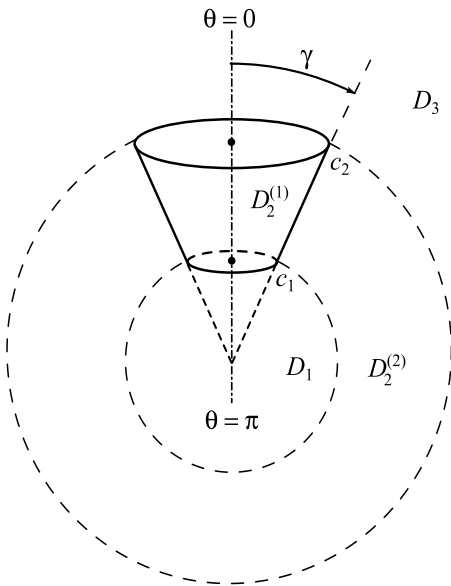


Рисунок 1 – Геометрична схема конуса: (а) $c_1 = 0$, $c_2 \neq 0$ – скінченний; (б) $c_1 \neq 0$, $c_2 \rightarrow \infty$ – напівнескінченний зі зрізаною вершиною; (в) $c_1 \neq 0$, $c_2 \neq 0$ – скінченний зі зрізаною вершиною

Гармонічну залежність від часу задаємо множником $\exp(-i\omega t)$, який опускаємо. Задачу дифракції формулюємо як крайову задачу для рівняння Гельмгольца відносно скалярного потенціалу швидкості дифрагованого поля $U(r, \theta)$, що задовольняє умову Діріхле або Неймана на поверхні Q_2 відповідно для м'якого і жорсткого конусів.

Розв'язок задачі подаємо рядами власних функцій підобластей: $D_2^{(1)} : \{r \in (0, c_2); \theta \in [0, \gamma)\}$, $D_2^{(2)} : \{r \in (0, c_2); \theta \in (\gamma, \pi]\}$, $D_3 : \{r \in (c_2, \infty); \theta \in [0, \pi]\}$, утворених конусом Q_2 , у вигляді

$$U(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{sr}} \begin{cases} \sum_{p=1}^{\infty} \bar{y}_p^{(2,1)} P_{\nu_p-1/2}(\cos \theta) \frac{I_{\nu_p}(sr)}{I_{\nu_p}(sc_2)}; & (r, \theta) \in D_2^{(1)} \\ \sum_{k=1}^{\infty} \bar{y}_k^{(2,2)} P_{\mu_k-1/2}(-\cos \theta) \frac{I_{\mu_k}(sr)}{I_{\mu_k}(sc_2)}; & (r, \theta) \in D_2^{(2)} \\ \Phi_2(sr) + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{x}_n^{(2)} P_{z_n-1/2}(\cos \theta) \frac{K_{z_n}(sr)}{K_{z_n}(sc_2)}. & (r, \theta) \in D_3 \end{cases} \quad (1)$$

Тут $\bar{y}_p^{(2,1)}$, $\bar{y}_k^{(2,2)}$, $\bar{x}_n^{(2)}$ – невідомі коефіцієнти розкладу; $s = -ik$; $P_{\eta-1/2}(\cdot)$ – функція Лежандра; $I_{\eta}(\cdot)$ – модифікована функція Бесселя; $K_{\eta}(\cdot)$ – функція Макдональда; ν_p , μ_k – додатні корені трансцендентних рівнянь:

$$P_{\nu_p-1/2}(\cos \gamma) = 0, P_{\mu_k-1/2}(-\cos \gamma) = 0 \text{ для } S\text{-випадку}; \quad (2)$$

$$P_{\nu_p-1/2}^1(\cos \gamma) = 0, P_{\mu_k-1/2}^1(-\cos \gamma) = 0 \text{ для } R\text{-випадку}; \quad (3)$$

де $P_{\eta-1/2}^1(\cdot)$ – приєднана функція Лежандра; $z_n = n - 1/2$ і $\Phi_2(sr) \equiv 0$ для S -випадку; $z_n = n + 1/2$ і $\Phi_2(sr) \equiv \bar{x}_0^{(2)} K_{1/2}(sr) / K_{1/2}(sc_2)$, де $\bar{x}_0^{(2)}$ – невідомий коефіцієнт, для R -випадку.

Подання поля у вигляді (1) забезпечує виконання граничних умов, умов випромінювання Зомерфельда і обмеженості акустичного поля у вершині.

Для визначення невідомих коефіцієнтів розкладу використаємо умови неперервності повного поля та його нормальної похідної на поверхні сфери радіуса $r = c_2$. У такий спосіб отримуємо суматорні рівняння дифракційної задачі. Для випадку жорсткого конуса додатково враховуємо незалежну від координати θ поршневу моду. Суматорні рівняння зводимо до НСЛАР методом перерозкладу функцій Лежандра. При виведенні НСЛАР обмежуємось умовою $\gamma \neq \pi/2$, випадок $\gamma = \pi/2$ розглядаємо окремо.

Далі будуємо оператор, який дозволяє точно обернути сингулярну частину вихідної дифракційної задачі і звести її до НСЛАР другого роду, яку записуємо у вигляді

$$X^{(2)} = A^{-1}(A - A_{22})X^{(2)} + A^{-1}F^{(2)}. \quad (4)$$

Тут $X^{(2)} = \{x_n^{(2)}\}_{n=1}^{\infty}$, $x_n^{(2)} = q(z_n, \gamma) \bar{x}_n^{(2)}$, де $q(z_n, \gamma) = P_{z_n-1/2}^l(\cos \gamma)$, $l = 0$ для S -випадку і $l = 1$ для R -випадку; $F^{(2)}$ – відомий вектор; A_{22} – нескінченна матриця з елементами

$$A_{22} : \left\{ a_{qn}^{(22)} = \frac{sc_2 W \left[K_{z_n} I_{\xi_q} \right]_{sc_2}}{\left[\xi_q^2 - z_n^2 \right] K_{z_n}(sc_2) I_{\xi_q}(sc_2)} \right\}_{q,n=1}^{\infty}. \quad (5)$$

Тут $\{\xi_q\}_{q=1}^{\infty}$ – зростаюча послідовність індексів, $\{\xi_q\}_{q=1}^{\infty} = \{v_p\}_{p=1}^{\infty} \cup \{\mu_k\}_{k=1}^{\infty}$, де v_p, μ_k – визначено з розв'язків рівняння (2) для S -випадку і $\{\xi_q\}_{q=1}^{\infty} = \{1/2\} \cup \{v_p\}_{p=2}^{\infty} \cup \{\mu_k\}_{k=2}^{\infty}$, де v_p, μ_k – визначено з розв'язків (3) для R -випадку; $W[\beta\sigma]_k = \beta(k)\sigma'(k) - \sigma(k)\beta'(k)$; матричні елементи регуляризуючих операторів A, A^{-1} записуємо так

$$A : \left\{ a_{qn} = \left\langle \xi_q - z_n \right\rangle^{-1} \right\}_{q,n=1}^{\infty}, \quad A^{-1} : \left\{ \tau_{kq} = \left\langle \left\{ M_-^{-1}(\xi_q, \gamma) \right\}' M'_-(z_k, \gamma) (z_k - \xi_q) \right\rangle^{-1} \right\}_{k,q=1}^{\infty}. \quad (6)$$

Тут $M_-(v, \gamma)$ отримуємо у результаті факторизації парної мероморфної функції

$$M(v, \gamma) = M_+(v, \gamma) M_-(v, \gamma) = \frac{\cos \pi v}{\pi} \begin{cases} \{P_{v-1/2}(\cos \gamma) P_{v-1/2}(-\cos \gamma)\}^{-1} & \text{для } S\text{-випадку;} \\ -\{P_{v-1/2}^1(\cos \gamma) P_{v-1/2}^1(-\cos \gamma)\}^{-1} & \text{для } R\text{-випадку,} \end{cases}$$

яка регулярна у смузі $\Pi : \{|\operatorname{Re} v| < 1/2\}$, а за межами Π має прості нулі і полюси відповідно у точках $\pm z_k, \pm \xi_q$ ($k, q = \overline{1, \infty}$); $M_+(v, \gamma)$ і $M_-(v, \gamma)$ регулярні відповідно у півплощинах $\operatorname{Re} v > -1/2$ і $\operatorname{Re} v < 1/2$; при $|v| \rightarrow \infty$ $M_-(v, \gamma) = O(v^{\pm 1/2})$ в областях регулярності, де верхній знак відповідає S -випадку, а нижній – R -випадку.

НСЛАР (4) допускає розв'язок у класі послідовностей

$$b(\sigma) : \left\{ \|X^{(2)}\| = \sup_n |x_n^{(2)} n^\sigma|, \lim_{n \rightarrow \infty} |x_n^{(2)} n^\sigma| = 0 \right\}. \quad (7)$$

Тут $0 \leq \sigma < 3/2$ для S -випадку і $0 \leq \sigma < 1/2$ для R -випадку, що забезпечує виконання умов Мейкснера на краю.

Отримано наближений розв'язок дифракційної задачі для низькочастотного випадку ($kc_2 \ll 1$) у вигляді ряду за зростаючими степенями sc_2

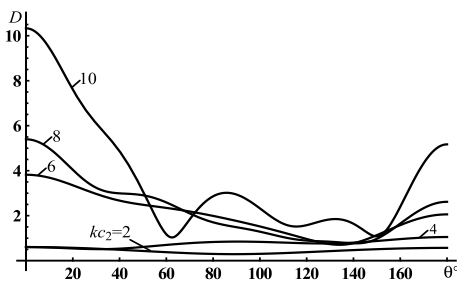
$$x_k^{(2)} = \frac{\sqrt{2\pi}}{M'_-(z_k, \gamma)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{z_n-1/2} q(z_n, \gamma) M_+(z_n, \gamma)}{(z_n + z_k) \Gamma(z_n)} \left(\frac{sc_2}{2} \right)^{z_n}.$$

Розглянуто випадок, коли конус вироджується у диск ($\gamma = \pi/2$). Показано, що для цього граничного випадку задача дифракції також зводиться до НСЛАР (4), де регуляризуючі оператори A , A^{-1} знаходяться за формулами (6), а $M_-(v, \gamma)$ визначається шляхом факторизації функції

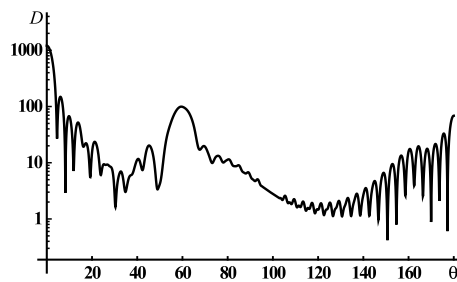
$$M(v, \pi/2) = \frac{1}{4\pi \Gamma(v+1/2) \Gamma(-v+1/2)} \begin{cases} 4\Gamma^2(v/2+3/4) \Gamma^2(-v/2+3/4); \\ -\Gamma^2(v/2+1/4) \Gamma^2(-v/2+1/4). \end{cases}$$

НСЛАР (4) допускає розв'язання методом редукції і гарантує, що зі зростанням параметра редукції N похибка розрахунку $e(N) \rightarrow 0$ (при $N \rightarrow \infty$). Встановили, що для забезпечення похибки $e < 0.2\%$ параметр редукції треба вибирати з умови: $N = [sc_2] + 1_2$, де $1_2 = 4 \dots 10$.

Достовірність отриманих результатів встановлювалась шляхом перевірки виконання умов спряження акустичних полів на границях виділених підобластей та зіставленням наших результатів у граничних випадках із відомими.



а



б

Рисунок 2 – Діаграми спрямованості жорсткого конуса з кутом розхилу $\gamma = 30^\circ$: (а) $2 \leq kc_2 \leq 10$; (б) $kc_2 = 100$

Дослідили діаграми спрямованості D м'якого і жорсткого конусів (рис. 2) при їх осьовому опроміненні плоскою хвилею зі сторони вершини ($\gamma < 90^\circ$) та основи ($\gamma > 90^\circ$). Показали, що у низькочастотному випадку ($kc_2 < 1$)

дифраговане поле практично не залежить від напрямку опромінення і характеризується монопольним та дипольним типами розсіювання відповідно для м'якого та жорсткого конусів. Зі зростанням частоти ($kc_2 > 6$) при опроміненні конуса зі сторони вершини максимум випромінювання дифрагованого поля спрямовано "вперед" $\theta = 0^\circ$ (рис. 2, а, б), а для дуже великих конусів ($c_2 > 15\lambda$) спостерігається яскраве виділення дзеркально відбитого поля при $\theta = 2\gamma$ (рис. 2, б). При опроміненні конуса в основу спостерігаємо суттєве розсіювання як "вперед", так і "назад" ($\theta = 180^\circ$).

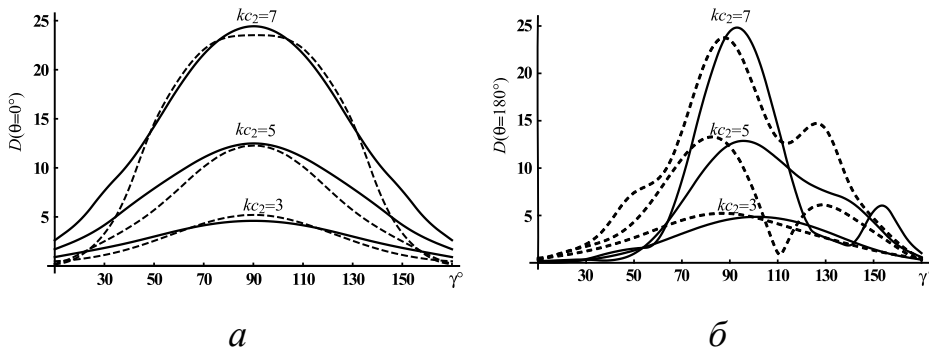


Рисунок 3 – Залежності $D(\theta)$ (а) при $\theta=0^\circ$ і (б) при $\theta=180^\circ$ від γ для різних kc_2 : неперервна лінія – м'який конус, штрихова лінія – жорсткий конус

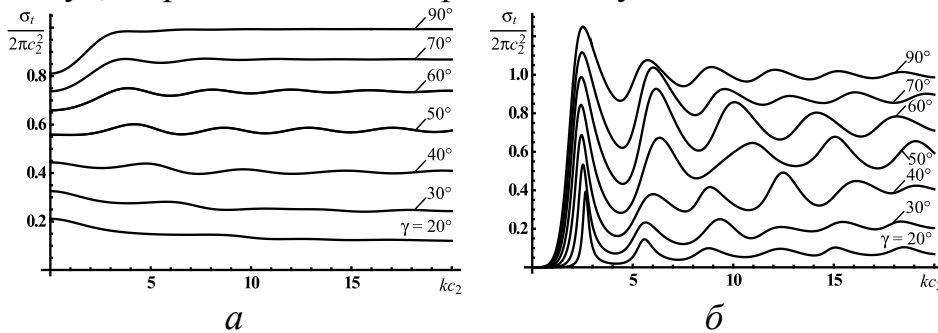


Рисунок 4 – Сімейства нормованих повних перерізів розсіювання як функції параметрів γ і kc_2 : (а) м'який конус; (б) жорсткий конус

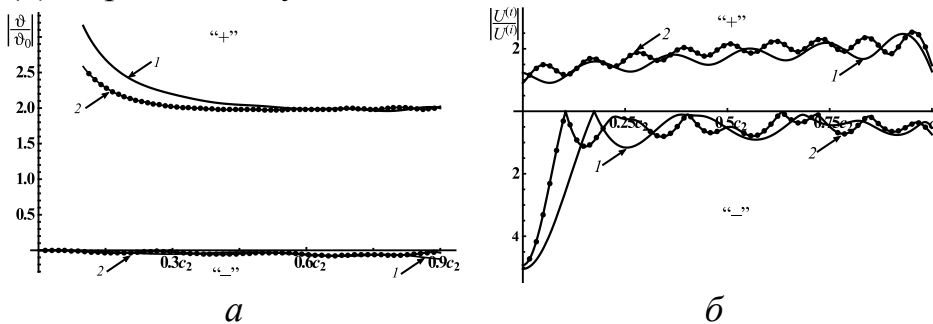


Рисунок 5 – Акустичні поля вздовж поверхні конуса: (а) м'який конус; (б) жорсткий конус; "+" – освітлена сторона; "-" – тіньова сторона; 1 – $kc_2 = 18$; 2 – $kc_2 = 30$

но, що розподіл повного поля на боковій поверхні жорсткого конуса має осцилюючий характер, а на формування поля суттєво впливає збудження поршневої моди.

У розділі 3 розв'язується задача дифракції акустичної хвилі на напівнескінченному м'якому і жорсткому конусах зі зрізаною вершиною (рис. 1, параметри б)

$$Q_1: \{r \in (c_1, \infty); \theta = \gamma; \varphi \in [0, 2\pi)\},$$

яка поширюється вздовж його осі. Поле у підобластях $D_1: \{r \in (0, c_1); \theta \in [0, \pi]\}$, $D_2^{(1)}: \{r \in (c_1, \infty); \theta \in [0, \gamma]\}$, $D_2^{(2)}: \{r \in (c_1, \infty); \theta \in (\gamma, \pi]\}$ подавали рядами власних функцій, що задовольняють граничній умові Діріхле (Неймана) на поверхні Q_1 , умові граничного поглинання та умові обмеженості поля в початку системи координат. Для зручності за первинне поле приймали поле плоскої хвилі у напівнескінченній

Встановлена можливість визначення одного з геометричних параметрів конуса (c_2 або γ), коли інший є відомим, за значення модуля потенціалу швидкості дифрагovanого поля (рис. 3), розсіяного у напрямку "вперед" і "назад".

Дослідили нормований повний переріз розсіювання (рис. 4). Виявили, що σ_t для жорсткого конуса при $c_2 < \lambda/2$ має резонансний характер, головний максимум, якого зростає при $\gamma \rightarrow \pi/2$.

Дослідили нормовані розподіли коливальної швидкості ϑ (рис. 5, а) і повного тиску $U^{(t)}$ (рис. 5, б) на боковій поверхні відповідно м'якого і жорсткого конусів. У випадку м'якого конуса виявлено зростання коливальної швидкості при підході до вершини (рис. 5, а). Показано, що розподіл повного поля на боковій поверхні жорсткого конуса має осцилюючий характер, а на формування поля суттєво впливає збудження поршневої моди.

конічній області. Для цього додатково розв'язували задачу дифракції на напів-нескінченному конусі з використанням інтегрального перетворення Конторовича-Лебедева.

Використовуючи підхід, розвинутий у розділі 2, задачу звели до НСЛАР другого роду, яку у матричному вигляді записуємо так

$$X^{(1)} = A^{-1}(A - A_{11})X^{(1)} + A^{-1}F^{(1)}. \quad (8)$$

Тут $X^{(1)} = \{x_n^{(1)}\}_{n=1}^{\infty}$, де $x_n^{(1)} = q(z_n, \gamma)\bar{x}_n^{(1)}$; $F^{(1)}$ – відомий вектор; A_{11} – матричний оператор з елементами

$$A_{11} : \left\{ a_{qn}^{(11)} = \frac{sc_1 W \left[K_{\xi_q} I_{z_n} \right]_{sc_1}}{\left[\xi_q^2 - z_n^2 \right] K_{\xi_q} (sc_1) I_{z_n} (sc_1)} \right\}_{q,n=1}^{\infty}. \quad (9)$$

Доведено, що розв'язок НСЛАР (8) існує в просторі (7).

На основі аналізу виразів (9) і (5) встановлюємо зв'язок між матричними елементами A_{11} та A_{22} , який формулюється у вигляді теореми.

Теорема. Зв'язок між матричними операторами, які описують дифракцію хвиль на круговій апертурі напівнескінченного конуса зі зрізаною вершиною Q_1 та на апертурі доповнюючого скінченного конуса Q_2 , визначається співвідношенням

$$a_{qn}^{(11)} = -a_{qn}^{(22)} (\xi_q \rightarrow z_n, z_n \rightarrow \xi_q),$$

$$a_{qn}^{(22)} = -a_{qn}^{(11)} (\xi_q \rightarrow z_n, z_n \rightarrow \xi_q),$$

де позначення $\xi_q \rightarrow z_n, z_n \rightarrow \xi_q$ вказують на заміну індексів.

Для встановлення достовірності отриманих результатів перевіряли виконання умов спряження акустичних полів. Далі аналізували діаграми спрямованості D для двох випадків опромінення: зі сторони зрізу (хвиля проникає у каверну, $\gamma < 90^\circ$) та зі сторони основи (хвиля виходить із каверни, $\gamma > 90^\circ$). В області $0 \leq \theta \leq \gamma$ досліджували повне поле, а в $\gamma \leq \theta \leq \pi$ дифраговане поле. Встановили можливість фокусування поля випромінювання у напрямку поширення хвилі та вияснили вплив на його структуру параметра зрізу kc_1 і кута розхилу γ .

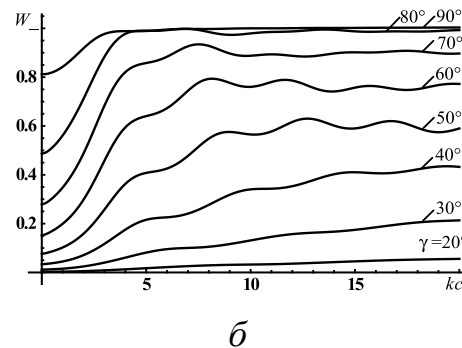
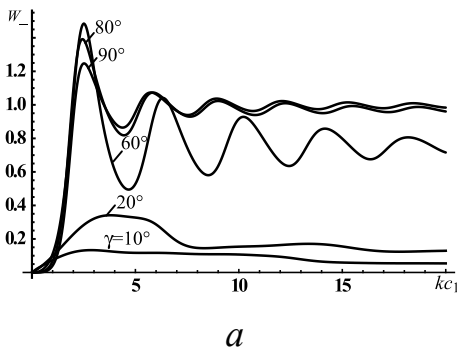


Рисунок 6 – Сімейство залежностей $W_-(kc_1)$ для різних γ :
(а) м'який конус; (б) жорсткий конус

розсіювання скінченного конуса Q_2 , тут резонансний характер розсіювання спостерігаємо для м'яких напівнескінченних конусів зі зрізаною вершиною Q_1 .

Дослідили коефіцієнт відбивання W_- (рис. 6), який визначає потужність випромінювання акустичної хвилі в кутову область $\gamma \leq \theta \leq \pi$. Встановили, що на відмінну від жорстких поверхонь, де спостерігаємо низькочастотне резонансне

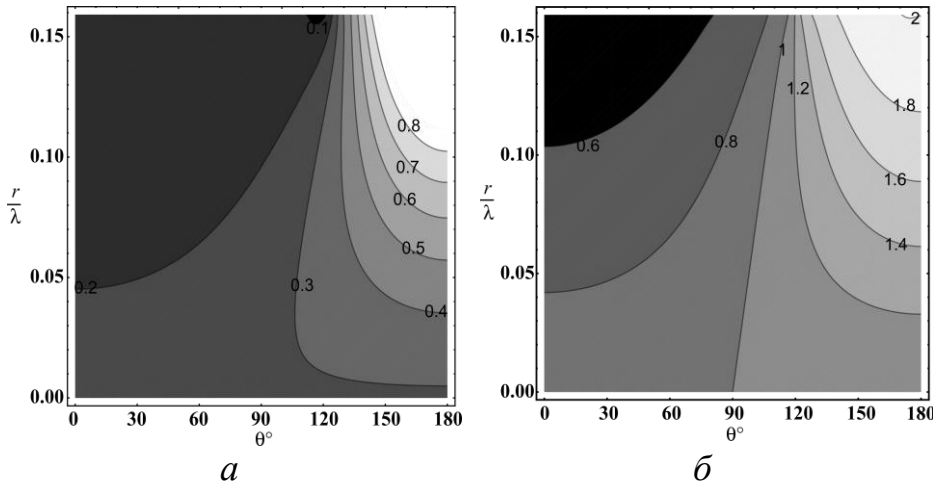


Рисунок 7 – Розподіл нормованої амплітуди тиску у ближньому полі конуса Q_1 з кутом розхилу $\gamma = 120^\circ$ і $c_1/\lambda = 0.1592$: (а) м'який конус; (б) жорсткий конус

Вияснили, що у випадку, коли радіус отвору $a_1 = c_1 \sin \gamma \ll \lambda$, то в околі апертури поле концентрується монотонно (рис. 7). Цю властивість можна використати при конструюванні зондів. Показано, що для великих розмірів отвору $a_1 \gg \lambda$ суттєвими стають дифракційні ефекти, які ускладнюють структуру поля в околі апертури.

У розділі 4 розв'язана осесиметрична задача дифракції плоскої акустичної хвилі на скінченному порожнистому м'якому (жорсткому) конусі зі зрізаною вершиною

$$Q_{12} : \{r \in (c_1, c_2); \theta = \gamma; \varphi \in [0, 2\pi)\}$$

при осьовому опроміненні (див. рис. 1, параметри в). Часткові випадки цієї задачі, коли $c_1 = 0$ розв'язано у розділі 2, а коли $c_2 \rightarrow \infty$ – в розділі 3.

Тут методом власних функцій сумісно з процедурою аналітичної регуляризації розв'язок дифракційної задачі звели до НСЛАР другого роду вигляду:

$$\begin{cases} X^{(1)} = A^{-1}(A - A_{11})X^{(1)} - A^{-1}A_{12}X^{(2)} + A^{-1}F^{(1)}, \\ X^{(2)} = A^{-1}(A - A_{22})X^{(2)} - A^{-1}A_{21}X^{(1)} + A^{-1}F^{(2)}, \end{cases}$$

де діагональні матричні оператори A_{11} і A_{22} відповідають задачам дифракції на конусах Q_1 і Q_2 , а недіагональні оператори A_{12} , A_{21} – описують взаємодію між краями

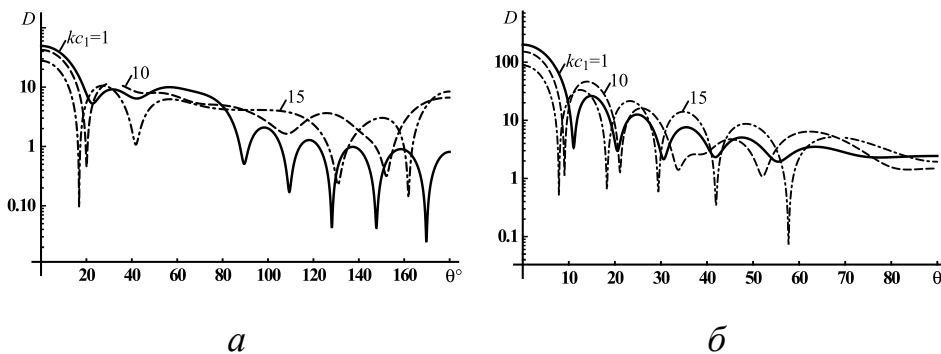


Рисунок 8 – Вплив хвильового радіусу зрізу kc_1 ($kc_1 = 1$; 10; 15) на діаграми спрямованості м'якого конуса при $kc_2 = 20$: (а) $\gamma = 30^\circ$; (б) $\gamma = 90^\circ$

Показано, що напівнескінченний конус зі зрізаною вершиною можна використати у якості зонда. Для цього розглянули випадок, коли хвиля виходить із каверни ($\gamma = 120^\circ$). Аналізували ізобари повного поля в координатах (r, θ) для двох випадків:

$c_1/\lambda = 0.1592$ (малий отвір; рис. 7) і $c_1/\lambda = 1.5916$ (великий отвір).

конуса Q_{12} . Дослідили дифракцію поля плоскої акустичної хвилі на м'якому конусі. Спершу перевірили виконання умов спряження полів. Далі проаналізували діаграми спрямованості (рис. 8) конусів Q_{12} , зокрема, кілець, коли $\gamma \rightarrow \pi/2$. Встановлено, що зі зроста-

нням хвильового радіусу зрізу вершини скінченного конуса kc_1 інтенсивність випромінювання в напрямі головної пелюстки ($\theta = 0^\circ$) зменшується. При цьому спостерігається зростання випромінювання у зворотному напрямі (рис. 8, а).

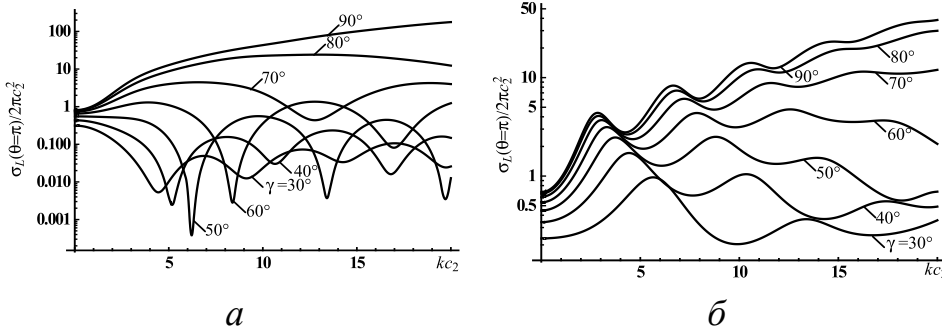


Рисунок 9 – Залежності позиційних перерізів розсіювання від параметрів kc_2 і γ : (а) $c_1 = 0.25c_2$; (б) $c_1 = 0.75c_2$

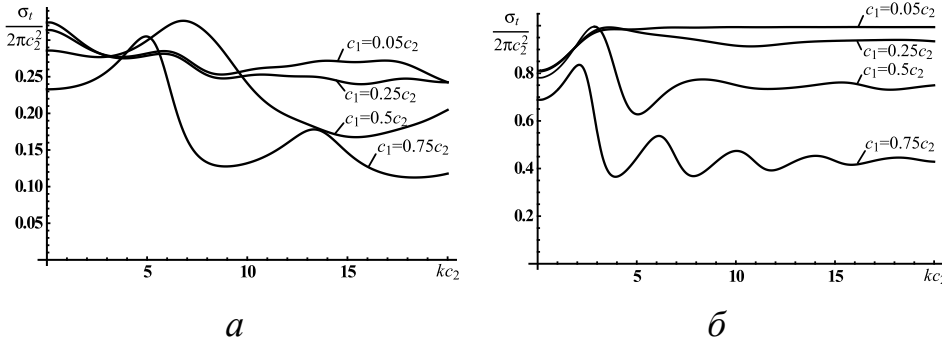


Рисунок 10 – Залежність повного нормованого перерізу розсіювання від довжини твірної kc_2 при різних радіусах зрізу: (а) $\gamma = 30^\circ$; (б) $\gamma = 90^\circ$

зростання відношення $c_1 / c_2 > 0.25$ приводить до значного зменшення перерізів розсіювання σ_t , що зумовлено зменшенням площі розсіювача.

У розділі 5 розв'язано задачу дифракції плоскої акустичної хвилі на скінченному конусі Q_2 при боковому опроміненні. Розглядали м'який і жорсткий конуси, коли акустична хвиля поширюється у напрямку $\vec{n} = \vec{n}(\sin \alpha \cos \varphi; 0; \cos \alpha)$ під кутом α (рис. 11) до осі z і характеризується потенціалом швидкості

$$U^{(i)}(r, \theta, \varphi) = \exp \{ ikr [\sin \alpha \sin \theta \cos \varphi + \cos \alpha \cos \theta] \}.$$

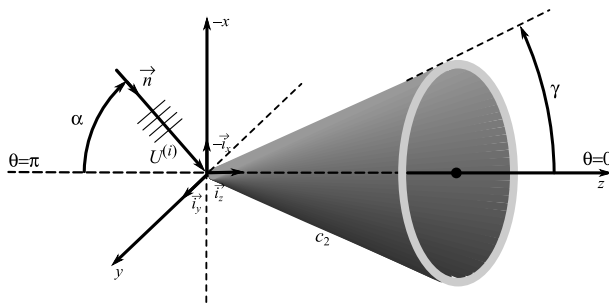


Рисунок 11 – Схема опромінення

Процедура отримання розв'язку дифракційної задачі аналогічна описаній вище.

Дослідили залежності позиційних перерізів зворотного розсіювання від радіусу зрізу для різних значень кута розхилу γ (рис. 9). Встановили, що ці залежності дозволяють знаходити кут розхилу конуса Q_{12} при $\gamma \leq 60^\circ$ за мінімумами σ_L при малих радіусах зрізу вершини (рис. 9, а).

Встановили закономірності впливу параметра c_1 / c_2 та кута γ на нормовані повні перерізи розсіювання σ_t . Відповідні залежності показано на рис. 10. Виявили, що

Дифракційна задача формулюється як крайова для рівняння Гельмгольца відносно азимутальних гармонік $U_m(r, \theta)$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), які отримуємо розкладом невідомого потенціалу швидкості дифрагованого поля $U(r, \theta, \varphi)$ в ряд Фур'є за координатою φ .

Спочатку методами власних функцій та методом спряження полів дифракційну задачу зводимо до системи суматорних рівнянь для кожної азимутальної гармоніки m ($m = \overline{0, \infty}$). Застосовуючи метод перерозкладу функцій Лежандра та процедуру аналітичної регуляризації, отримуємо НСЛАР другого роду, яку для кожної гармоніки m записували так

$$X^{(m;2)} = A^{-1}(m)(A(m) - A_{22}(m))X^{(m;2)} + A^{-1}(m)F^{(m;2)}.$$

Вияснили вплив параметра m на формування діаграм спрямованості $D(\theta, \varphi)$. Встановили, що цей параметр визначається цілою частиною хвильової довжини конуса, $m = [|\text{sc}_2|] + \iota_1$, де $\iota_1 = 1 \dots 4$.

Дослідили розсіяння поля вузьким конусом ($\gamma = 30^\circ$) у резонансній області. Для фіксованого параметра $kc_2 = 6$ провели аналіз просторових діаграм спрямованості дифрагованих полів $D(\theta, \varphi)$ в координатах ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$). Виявили утворення просторових екстремумів поля, а також тенденцію до формування максимуму діаграми спрямованості у напрямку кута опромінення $\theta = \alpha$ у площині $\varphi = 0^\circ$ (рис. 12).

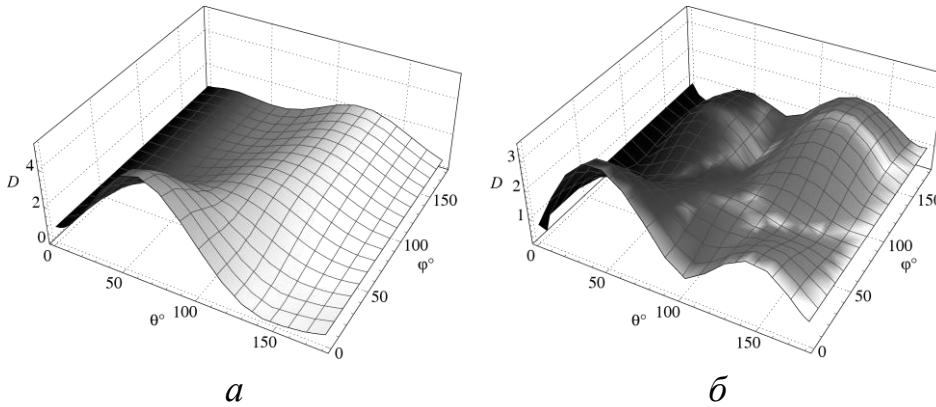


Рисунок 12 – Просторові діаграми спрямованості дифрагованого поля як функції кутів спостереження (θ, φ) при $\gamma = 30^\circ$, $kc_2 = 6$, $\alpha = 60^\circ$: (а) м'який конус; (б) жорсткий конус

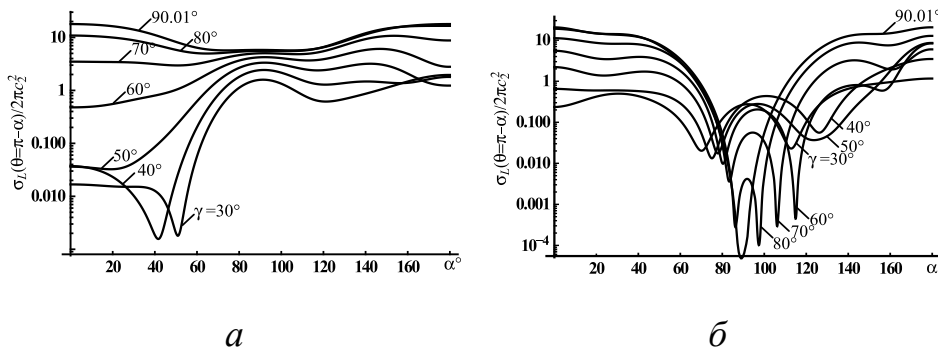


Рисунок 13 – Залежності позиційних перерізів розсіювання від кута падіння α при $kc_2 = 6$ для $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$: (а) м'який конус; (б) жорсткий конус

Отримали залежності зворотних перерізів розсіювання $\sigma_L(\theta = \pi - \alpha, \varphi = 0)$ від кута α для м'якого та жорсткого конусів при різних значеннях γ . Характерні залежності приведено на рис. 13. Наприклад, встановили, що для жорсткого конуса (рис. 13, б) σ_L досягають своїх мінімумів при $80^\circ < \alpha < 120^\circ$, що є інформативним параметром, бо дозволяє встановити кут розхилу конуса в області $60^\circ \leq \gamma < 90^\circ$. Показано, що при $\gamma \rightarrow \pi/2$ (перехід конуса в диск) мінімум випромінювання назад спостерігаємо при освітленні диска в торець.

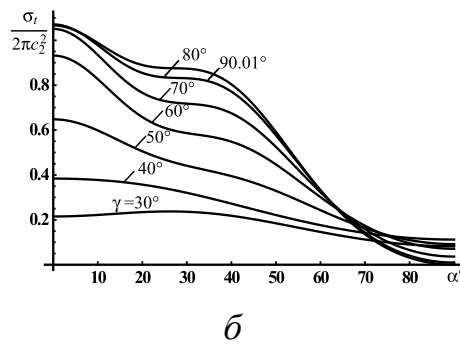
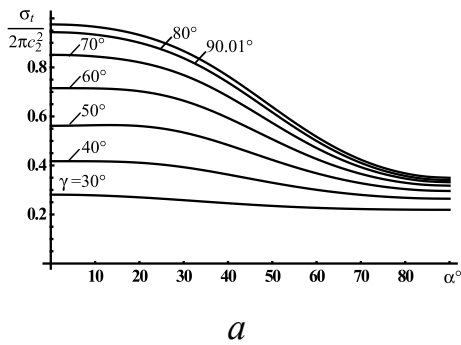


Рисунок 14 – Залежність повних перерізів розсіювання від кута опромінення при $k c_2 = 6$: (а) м'який конус; (б) жорсткий конус

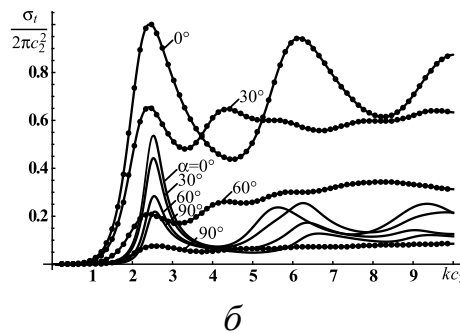
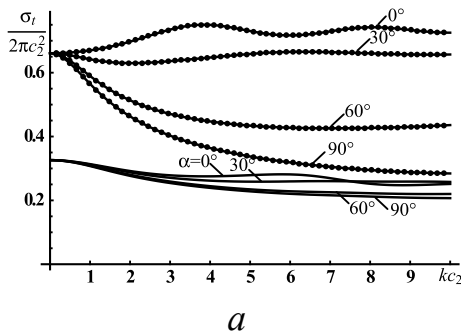


Рисунок 15 – Залежності повних нормованих перерізів розсіювання від $k c_2$ для різних α : суцільна лінія – $\gamma = 30^\circ$, маркована лінія – $\gamma = 60^\circ$; (а) м'який конус; (б) жорсткий конус

його вплив на широкі конуси ($\gamma \geq 60^\circ$). Для широких жорстких конусів Q_2 , як і у випадку осьового опромінення, спостерігали резонансний характер розсіювання на низьких частотах.

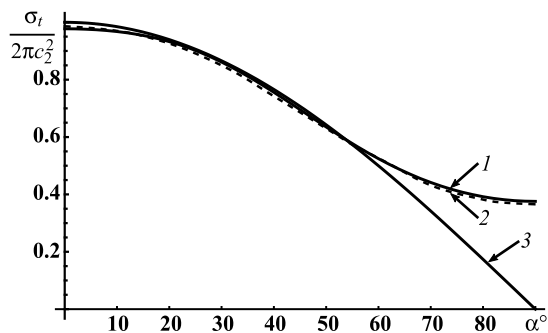


Рисунок 16 – Порівняння нормованих перерізів розсіювання як функції α для м'якого диска при $k c_2 = 5$: 1 – $\gamma = 90.01^\circ$; 2 – отримано методом T -матриць; 3 – наближення геометричної оптики, $\cos \alpha$

Проаналізовано залежності повних нормованих перерізів розсіювання σ_t від кута опромінення α для м'якого (рис. 14, а) і жорсткого (рис. 14, б) конусів. Спостерігали загальну тенденцію монотонного спадання σ_t зі зростанням кута α (рис. 14).

Вияснено вплив хвильового параметра $k c_2$ при фіксованому куті опромінення α на нормовані повні перерізи розсіювання σ_t м'якого (рис. 15, а) та жорсткого (рис. 15, б) конусів. Виявили незначний вплив кута опромінення α на σ_t для вузьких конусів ($\gamma \leq 30^\circ$) та суттєвий

Останній підрозділ присвячено проведенню верифікації отриманих результатів. Їх проводили шляхом зіставлення модулів тисків і коливальних швидкостей на границях спряження полів та порівнянням дифрагованих полів у зоні випромінювання для дисків. Порівняння нормованих повних перерізів розсіювання σ_t м'якого диска показано на рис. 16. Із рис. 16 спостерігаємо добре узгодження наших результатів (крива 1) із отриманими методом T -матриць (крива 2) у всьому діапазоні зміни α та з наближенням геометричної оптики (крива 3) до $\alpha < 60^\circ$.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена дослідженню взаємодії плоскої акустичної хвилі, що гармонічно залежить від часу, з м'якими і жорсткими конічними поверхнями з круговими краями. У результаті виконання роботи встановлені закономірності та виявлені особливості формування полів у ближній та дальній зонах, позиційних і повних перерізів розсіювання в залежності від геометричних параметрів розсіювачів, частоти і кута падіння зондувальної хвилі.

Найважливіші результати досліджень полягають у наступному:

1. Методом розкладу потенціалу швидкості в ряди за власними функціями підобластей сумісно з методами спряження полів і аналітичної регуляризації задачі дифракції на м'яких та жорстких конусах з круговими краями при довільному куті опромінення плоскою акустичною хвилею зведено до НСЛАР другого роду для кожної азимутальної гармоніки поля. Розв'язки отриманих НСЛАР забезпечують виконання усіх необхідних умов, включаючи умови на краях і враховують збудження поршневої моди для жорстких розсіювачів. Встановлено зв'язок між хвильовими розмірами конусів і порядком редукції меридіональних та азимутальних гармонік для встановлення поля в зоні випромінювання.
2. Отримано коректні граничні переходи від задач дифракції на конусах з краями до задач дифракції на дисках та кільцях. Для цих випадків у явному вигляді побудовано нові регуляризуючі оператори; отримано наближені аналітичні розв'язки задач дифракції на м'яких та жорстких дисках та конусах з краями у низькочастотній області.
3. Встановлено закономірності формування дифрагованих полів, розсіяних м'якими і жорсткими конусами скінченної довжини, в широкому діапазоні зміни геометричних параметрів і частоти при їх осьовому опроміненні зі сторони вершини і основи у ближній і дальній зонах; показано, що при опроміненні конуса зі сторони вершини та основи головний максимум дифрагованого поля орієнтований в напрямі $\theta = 0^\circ$; для великих конусів ($c_2 > 15\lambda$) характерним є формування інтенсивного дзеркального відбивання; у довгохвильовій області ($c_2 < \lambda / 2$) виявлено резонансний характер розсіювання жорсткого скінченного конуса; показано домінуючий вклад поршневої моди при формуванні повного поля в ближній зоні жорстких розсіювачів; встановлено можливість визначення одного з геометричних параметрів конуса (c_2 або γ), при одному відомому, за даними одночастотного зондування.
4. Встановлено закономірності впливу геометричних параметрів і частоти на випромінювання акустичного поля круговою апертурою конічної каверни, утвореної зрізом вершини напівнескінчених м'яких і жорстких конусів, зокрема виявлено ефект фокусування та запирання поля при його виході з каверни, а також ефект низькочастотного резонансного розсіювання м'якою каверною; показано можливість визначення радіусу апертури каверни за характеристиками дифрагованого поля; встановлено вплив радіусу апертури зрізаного конуса на розподіл ближнього поля і показано, що при $c_1 \sin \gamma \ll \lambda$ поле монотонно розподілене в околі апертури.

5. Встановлено вплив зрізу вершини скінченного м'якого конуса на його дифракційні характеристики при осьовому опроміненні плоскою акустичною хвилею; показано, що зі зростанням радіуса зрізу інтенсивність випромінювання в напрямку головної пелюстки діаграми спрямованості спадає; при $c_1 / c_2 > 0.25$, де $c_1 < c_2$ – сферичні радіуси отворів конічної оболонки, спадання інтенсивності випромінювання є значним.
6. Вперше встановлено закономірності дифракційних характеристик від кута опромінення м'якого і жорсткого скінченного конусів плоскою хвилею. Показано, що максимум дифрагованого поля формується в напрямку опромінення для обох типів поверхні, а також монотонне спадання повних перерізів розсіювання, коли кут опромінення наближається до напрямку перпендикулярного осі конуса. Виявлено глибокі мінімуми зворотних позиційних перерізах розсіювання для широких жорстких конусів $\gamma > 60^\circ$.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Куриляк Д. Б. Дифракція плоскої акустичної хвилі на скінченному жорсткому конусі при осьовому опроміненні / Д. Б. Куриляк, В. О. Лисечко // Акуст. вісн. – 2013–2014. – Т. 16, №2. – С. 8–17.
2. Куриляк Д. Б. Дифракція плоскої акустичної хвилі на скінченному м'якому конусі при осьовому опроміненні / Д. Б. Куриляк, В. О. Лисечко // Акуст. вісн. – 2013–2014. – Т. 16, №3. – С. 23–30.
3. Куриляк Д. Б. Дифракція плоскої акустичної хвилі на напівнескінченному м'якому конусі зі зрізаною вершиною / Д. Б. Куриляк, В. О. Лисечко // Акуст. вісн. – 2013–2014. – Т. 16, №4. – С. 33–41.
4. Kuryliak D. B. Diffraction of a plane acoustic wave from a finite soft (rigid) cone in axial irradiation / D. B. Kuryliak, Z. T. Nazarchuk, V. O. Lysechko // Open Journal of Acoustics. – 2015. – Vol. 5, №4. – P. 193–206. <http://dx.doi.org/10.4236/oja.2015.54015>
5. Куриляк Д. Б. Розсіювання плоскої акустичної хвилі на жорстких зрізаному та скінченному конусах / Д. Б. Куриляк, В. О. Лисечко // Вісн. Київ. нац. ун-ту. Сер. Фіз.-мат. науки. – 2015. – Спецвипуск. – С. 143–148.
6. Лисечко В. О. Опромінення скінченого конуса плоскою звуковою хвилею / В. О. Лисечко, О. М. Шарабура // Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи: відкрита наукова конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України: Матеріали конференції КМН-2013 / Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – Львів, 2013. – С. 308 – 311.
7. Куриляк Д. Б. Дифракція плоскої акустичної хвилі на скінченному жорсткому (м'якому) конусі / Д. Б. Куриляк, В. О. Лисечко // Міжнародна математична конференція «Диференціальні рівняння, обчислювальна математика, теорія функцій та математичні методи механіки» до 100-річчю від дня народження члена-кореспондента НАН України Положого Георгія Миколайовича, 23–24 квітня

- 2014 р., м. Київ, Україна: Матеріали конференції. – К., 2014. – С. 80.
8. Лисечко В. О. Розсіяння плоскої акустичної хвилі скінченим конусом / В. О. Лисечко, Д. Б. Куриляк // П'ятнадцята міжнародна наукова конференція імені академіка Михайла Кравчука, 15–17 травня 2014 р., Київ: Матеріали конф. Т. 1. Диференціальні та інтегральні рівняння, їх застосування / Інститут математики НАН України [та ін.]. – К., 2014. – С. 195.
 9. Куриляк Д. Дифракція плоскої акустичної хвилі на скінченному м'якому (жорсткому) конусі при осьовому опроміненні / Д. Куриляк, В. Лисечко // Механіка руйнування матеріалів і конструкцій: Зб. наук. пр. 5-ої Міжнародної конференції (24–27 червня 2014 р., Львів) / під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів, 2014. – С. 85–90.
 10. Куриляк Д. Розсіяння плоскої звукової хвилі на скінченному м'якому (жорсткому) конусі / Д. Куриляк, В. Лисечко // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: [наук. пр.] / під заг. ред. І. О. Луковського, Г. С. Кіта, Р. М. Кушніра. – Львів, 2014. – С. 359–361.
 11. Kuryliak D. Diffraction of the sound wave by a finite soft (rigid) cone / D. Kuryliak, V. Lysechko // Proc. of XIXth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). – Tbilisi, 2014. – P. 160–162.
 12. Лисечко В. О. Дифракція плоскої акустичної хвилі на скінченному м'якому конусі при осьовому опроміненні / В. О. Лисечко // III науково-технічна конференція «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації», 25–26 вересня 2014 р., Львів: Зб. пр. / Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – Львів, 2014. – С. 143–144.
 13. Куриляк Д. Б. Дифракція плоскої акустичної хвилі на м'яких зрізаному і скінченному конусах при осьовому опроміненні / Д. Б. Куриляк, В. О. Лисечко // Шістнадцята міжнародна наукова конференція імені академіка Михайла Кравчука, 14–15 травня 2015 р., Київ: Матеріали конф. Т. 1. Диференціальні та інтегральні рівняння, їх застосування / Інститут математики НАН України [та ін.]. – К., 2015. – С. 148.
 14. Лисечко В. Розсіяння плоскої акустичної хвилі на напівнескінченному м'якому конусі зі зрізаною вершиною [Електронний ресурс] / В. Лисечко // Конференція молодих учених «Підстригачівські читання–2015», 26–28 травня 2015р., Львів. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://iapmm.lviv.ua/chyt2015/theses/Lysechko.pdf>. – Назва з екрану. – Дата звернення: 06.12.2015.
 15. Kuryliak D. Functional series equations for acoustic axially symmetric wave diffraction by finite soft and rigid cones / D. Kuryliak, V. Lysechko // International V. Skorobohatko mathematical conference (August 25–28, Drohobych, Ukraine): Abstracts. – Lviv, 2015. – P. 89.
 16. Куриляк Д. Б. Розсіювання плоскої акустичної хвилі на жорстких зрізаному та скінченному конусах / Д. Б. Куриляк, В. О. Лисечко // III Міжнародна конференція «Сучасні проблеми механіки»: Матеріали конференції, Київ, Україна, 27–29 серпня 2015. – К., 2015. – С. 44.
 17. Lysechko V. Diffraction of a plane acoustic wave by a semi-infinite truncated rigid cone in axial irradiation [Електронний ресурс] / V. Lysechko // International Young

- Scientists Forum on Applied Physics. – Dnipropetrovsk, 2015. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Заголовок з етикетки диску.
18. Kuryliak D. Diffraction of the sound wave from a soft disc / D. Kuryliak, V. Lysechko // Proc. of XXth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPEd). – Lviv, 2015. – P. 179–182.
 19. Куриляк Д. Б. Бокове опромінення м'якого скінченного конуса плоскою акустичною хвилею / Д. Б. Куриляк, В. О. Лисечко // Акустичний симпозіум «КОНСОНАНС-2015», Київ, 29–30 вересня 2015 р: зб. наук. пр. / Національна академія наук України, Інститут гідромеханіки. – К.: ІГМ НАНУ, 2015. – С. 129–134.
 20. Лисечко В. О. Дифракція звукової хвилі на жорсткому диску / В. О. Лисечко // Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи: відкрита наукова конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України: Матеріали конференції КМН-2015 / Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – Львів, 2015. – С. 236–239.

АНОТАЦІЯ

Лисечко В. О. Дифракція акустичних хвиль на фрагментах конічних поверхонь. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.06 – акустика. – Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, 2016.

У дисертаційній роботі досліджено дифракцію плоскої акустичної хвилі на м'яких та жорстких конічних поверхнях з круговими краями за довільних кутів опромінення.

Розв'язано осесиметричні задачі дифракції плоскої акустичної хвилі на скінченному та зрізаному напівнескінченному конусах, а також на скінченному конусі зі зрізаною вершиною. Задачі дифракції зведено до НСЛАР першого роду методом розкладу потенціалу поля за власними функціями рівняння Гельмгольца у виділених підобластях, з використанням спряження полів і властивості ортогональності власних функцій. Методом аналітичної регуляризації, яка полягає у виділенні сингулярної частини матричного оператора вихідної задачі та її аналітичному оберненні, дифракційну задачу зведено до НСЛАР другого роду. Розв'язок отриманої НСЛАР методом редукції забезпечує виконання усіх необхідних умов, включаючи умови на краю та враховує збудження поршневої моди у випадку жорстких розсіювачів. Досліджено часткові випадки, коли конічна поверхня вироджується у диск або кільце.

Досліджено поведінку акустичних полів на поверхні скінченних конусів при їх опроміненні зі сторони вершини та основи. Вивчено вплив радіусу зрізу на формування ближнього поля в околі апертури, утвореної зрізом напівнескінченного конуса. Проаналізовано вплив довжин твірних та радіусів зрізу на формування полів у зоні випромінювання. Встановлено можливості визначення геометричних параметрів конічних структур при одночастотному зондуванні за значеннями модуля потенціалу поля випромінювання. У низькочастотному випадку побудовано аналітичний

розв'язок осесиметричної задачі дифракції на скінченному конусі.

Отримано розв'язок задачі дифракції акустичної хвилі на скінченному конусі при боковому опроміненні. Задачу розв'язано відносно скалярного потенціалу швидкості дифрагованого поля з використанням процедури аналітичної регуляризації. Розв'язок дифракційної задачі зведено до НСЛАР другого роду для кожної азимутальної гармоніки. Вивчено просторові діаграми спрямованості та енергетичні характеристики акустичних полів як функції кута опромінення та хвильового параметра.

Ключові слова: акустична хвиля, м'яка і жорстка поверхні, скінченний конус, конус зі зрізаною вершиною, бокове опромінення, аналітична регуляризація.

АННОТАЦІЯ

Лисечко В. О. Дифракция акустических волн на фрагментах конических поверхностей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика. – Институт гидромеханики НАН Украины. – Киев, 2016.

В диссертационной работе исследовано дифракцию плоской акустической волны на мягких и жестких конических поверхностях с круговыми ребрами при произвольном угле облучения.

Решены осесимметрические задачи дифракции плоской акустической волны на конечном и усеченном полубесконечном конусах, а также на конечном конусе с усеченной вершиной. Дифракционные задачи сведены к решению смешанных краевых задач для уравнения Гельмгольца с граничными условиями Дирихле и Неймана соответственно на поверхности мягкого и жесткого конусов. Дифрагированное поле в выделенных подобластях представлено в виде разложения неизвестного потенциала скорости в ряды по собственным функциям в каждой подобласти. Используя метод сопряжения полей и свойства ортогональности функций Лежандра дифракционные задачи сведены к БСЛАУ первого рода. Применяя метод аналитической регуляризации, который заключается в выделении сингулярной части матричного оператора исходной БСЛАУ и аналитическом обращении сингулярного оператора, приходим к БСЛАУ второго рода. Полученная БСЛАУ обеспечивает выполнение всех необходимых условий, включая условия на ребре и учитывает возбуждение поршневой моды для жестких рассеивателей. Исследован предельный переход от задач дифракции на конусах к задачам дифракции на дисках, кольцах и апертурах в плоскости. Задачи сведены к БСЛАУ второго рода с использованием метода аналитической регуляризации. Получены соответствующие этим задачам регуляризирующие операторы.

Исследовано поведение акустических полей, рассеянных на конических поверхностях с ребрами при их освещении со стороны вершины и основания. Проанализировано влияние геометрических параметров конусов и свойств поверхности на формирование полей в ближней и дальних зонах. Исследованы возможности определения геометрических параметров конических структур за результатами одночастотного зондирования плоской волной. Получено аналитическое решение осесимметричной задачи на конечном конусе в низкочастотном случае в виде разложения в

ряд по возрастающим степеням волнового параметра.

Решена задача дифракции акустической волны на конечном конусе при боковом облучении. Неизвестный потенциал скорости дифрагированного поля представлен рядом Фурье по азимутальным гармоникам, удовлетворяющим уравнению Гельмгольца с граничными условиями Дирихле и Неймана соответственно для мягкого и жесткого конусов. С помощью метода аналитической регуляризации решение дифракционной задачи сведено к БСЛАУ второго рода для каждой азимутальной гармоники. Исследованы пространственные диаграммы направленности и энергетические характеристики акустических полей как функции угла облучения и волнового параметра конуса.

Ключевые слова: акустическая волна, мягкая и жесткая поверхности, конечный конус, усеченный конус, боковое облучения, аналитическая регуляризация.

ABSTRACT

Lysechko V. O. Diffraction of acoustic waves by conical shapes. – On the manuscript.

Thesis for a degree of candidate in physics and mathematics on specialty 01.04.06 – Acoustics. – Institute of Hydromechanics, National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

This dissertation investigated the diffraction of a plane acoustic wave on soft and rigid conical surfaces with circular edges for arbitrary values of incident angle.

The axially-symmetric diffraction problems of a plane acoustic wave from finite and truncated semi-infinite cones as well as truncated finite cone are solved. The originally stated problems is reduced to the infinite system of linear algebraic equations (ISLAE) of the first kind by means of expansion in series of eigenfunctions of the Helmholtz equation into separation domains with making use of mode matching technique and orthogonality properties of eigenfunctions. Analytical regularization procedure is used in order to extract the singular logarithmic part in ISLAE and exactly convert it and thus the solution of initial diffraction problem is obtained in the form of ISLAE of the second kind. Accurate numerical solution of these equations based on truncation method, provides all necessary conditions, including edge conditions and excitement of a piston mode in the case of the rigid scatterer. The limiting case of a circular disc and a circular ring for both soft and rigid surfaces are considered.

The behavior of acoustic fields on the surface of finite cones irradiated in directions of vertex and base is considered. The influence of radius cutting on the formation of near-field in the vicinity of the aperture formed by cut of the semi-infinite cone. The formation of radiation in far field zone from cone-generating lengths and radius of cut is studied. The possibility to determine the geometrical parameters of conical structures by single-frequency sensing using the magnitude of the scattering field is established. In the low-frequency case, the approximate analytical solution of axial-symmetric diffraction problem for finite cone is obtained.

The solution of diffraction problem of acoustic wave scattering from the hollow finite cone at oblique incidence is obtained. The problem is solved relatively the scattered velocity

potential making use of the analytical regularization procedure. The solution of diffraction problem is reduced to ISLAE of the second kind for each azimuthal harmonic. The spatial far field patterns and energy distributions of acoustic field as functions of the incident angle and the wave parameter are studied.

Keywords: plane acoustic wave, soft and rigid surfaces, finite cone, truncated cone, oblique incidence, analytical regularization.

Підписано до друку 21.09.2016.
Формат 60х84/16. Гарнітура Times.
Ум. друк. арк. 0,9. Друк. цифровий.
Зам. №141. Наклад 100 прим.

Друк ПП «Видавництво «БОНА».
79060, вул. Наукова, 5, м. Львів.
Свідоцтво держ. реєстру ДК №4275.
Тел. (032) 254-02-74

