

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН	4
1.1. Распространение звука в идеальной жидкости	4
1.2. Распространение звуковых волн в упругих телах	7
2. ДИФРАКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА УПРУГОЙ СФЕРЕ, ИМЕ- ЮЩЕЙ ПРОИЗВОЛЬНО РАСПОЛОЖЕННУЮ ПОЛОСТЬ И НЕОД- НОРОДНОЕ ПОКРЫТИЕ	8
2.1. Обзор литературы по проблеме исследования	8
2.2. Постановка задачи	11
2.3. Аналитическое решение задачи	12
2.4. Решение краевой задачи для системы обыкновенных дифферен- циальных уравнений	26
3. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	27
3.1. Диаграмма направленности	27
3.2. Частотные характеристики	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
ЛИТЕРАТУРА	30
ПРИЛОЖЕНИЯ	31

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в изучении дифракции на различных телах очень высока. Знания, полученные путем изучения дифракции с помощью моделей, используются как в гидроакустике и эхолокации, так и в других областях. В дефектоскопии основной задачей является обнаружение различных включений в однородном теле. Это позволяет проводить исследование различных объектов методом неразрушающего контроля. Задача эхолокации — обнаружить и определить местоположение объектов по времени задержки отражённой волны.

Для современного мира изучение простых моделей уже не дает требуемой точности прогнозирования поведения волн. Поэтому, необходимо изучать более сложные модели, детально описывающие рассматриваемые тела и окружающую среду. Изучение тел с произвольно расположенными полостями является более трудной задачей, по сравнению с классическими моделями.

В настоящей работе рассматривается задача дифракции плоских звуковых волн на упругой сфере с произвольно расположенной полостью, заполненной жидкостью, и радиально-неоднородным упругим покрытием. С помощью таких покрытий можно изменять звукоотражающие свойства тел, что позволяет решать различные задачи по формированию заданной дифракционной картины. Такой слой возможно сделать в промышленных условиях, комбинируя несколько тонких однородных слоев с различными механическими характеристиками. В качестве рассматриваемого тела выбрана сфера, т.к. она является подходящей аппроксимацией для большинства сложных тел. В ходе работы получено аналитическое описание акустического поля, рассеянного телом, предложено решение полученной краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений и представлены результаты расчетов диаграмм направленности рассеянного поля и частотных характеристик для различных покрытий.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

1.1. Распространение звука в идеальной жидкости

Для математического процесса моделирования распространения звука в идеальной среде воспользуемся полной системой уравнений гидромеханики идеальной жидкости, описывающей любые движения идеальной жидкости. Эта система включает уравнение движения идеальной жидкости (уравнение Эйлера), уравнение неразрывности и уравнение физического состояния.

Математическое описание движения жидкости осуществляется с помощью функций, определяющих распределение скорости \bar{v} , давления P и плотности p . Уравнение Эйлера имеет вид

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} = \bar{F} - \frac{1}{p} \text{grad } P, \quad (1)$$

где \bar{F} — массовая сила, отнесённая к единице массы.

Уравнение неразрывности записывается в виде

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \text{div}(p\bar{v}) = 0. \quad (2)$$

Будем считать, что движение сжимаемой жидкости происходит адиабатически. В этом случае уравнение физического состояния принимает вид

$$P = P_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^\gamma, \quad \gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad (3)$$

где P_0 и p_0 — давление и плотность невозмущенной жидкости;

C_P и C_V — теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме.

Процесс распространения звука представляет собой малые колебания жидкости, так что в уравнении (1) можно пренебречь конвективными членами. Полагая, что внешние силы отсутствуют, получим:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\frac{1}{p} \text{grad } P. \quad (4)$$

Введем в рассмотрение величину s , называемую сжатием и равную отношению изменению плотности

$$s = \frac{p - p_0}{p_0}; \quad p = p_0(1 + s). \quad (5)$$

Тогда уравнение (3) перепишем в виде

$$P = P_0(1 + s)^\gamma. \quad (6)$$

При малых колебаниях жидкости сжатие s настолько мало, что высшими степенями s можно пренебречь. В результате из выражения (6) получим

$$P = P_0(1 + \gamma \cdot s). \quad (7)$$

Подставим выражение (5) в уравнение неразрывности. Так как

$$\operatorname{div}(p\bar{v}) = p \operatorname{div}(\bar{v}) + \bar{v} \operatorname{grad} p = p_0 \operatorname{div}(\bar{v}) + p_0 s \operatorname{div}(\bar{v}) + \bar{v} \operatorname{grad} p,$$

причем последними двумя слагаемыми можно пренебречь, то вместо уравнения (2) будем иметь

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div}(\bar{v}) = 0. \quad (8)$$

Уравнение (4) в том же приближении сводится к уравнению

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -c^2 \cdot \operatorname{grad} s, \quad (9)$$

где $c = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{p_0}}$ — скорость звука.

Предположим теперь, что в начальный момент существует потенциал скоростей $\tilde{\Psi}_0$, т.е.

$$\bar{v}|_{t=0} = \operatorname{grad} \tilde{\Psi}_0. \quad (10)$$

Из уравнения (9) имеем

$$\bar{v} = \bar{v}|_{t=0} - c^2 \operatorname{grad} \left(\int_0^t s \, dt \right).$$

С учетом (10) получаем

$$\bar{v} = \operatorname{grad} \left[\tilde{\Psi}_0 - c^2 \int_0^t s \, dt \right] = \operatorname{grad} \tilde{\Psi}. \quad (11)$$

Это означает, что существует потенциал скоростей $\tilde{\Psi}$ в любой момент времени t :

$$\tilde{\Psi} = \tilde{\Psi}_0 - c^2 \int_0^t s \, dt.$$

Дифференцируя последнее выражение два раза по t , получим

$$\frac{\partial^2 \tilde{\Psi}}{\partial t^2} = -c^2 \frac{\partial s}{\partial t}. \quad (12)$$

С другой стороны, подставляя выражение (11) в уравнение (8), будем иметь

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\operatorname{div} \operatorname{grad} \tilde{\Psi} = -\Delta \tilde{\Psi}. \quad (13)$$

Из уравнений (12) и (13) приходим к волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 \tilde{\Psi}}{\partial t^2} = c^2 \Delta \tilde{\Psi}, \quad (14)$$

которое описывает процесс распространения звука в идеальной жидкости.

Отметим, что знания потенциала $\tilde{\Psi}$ достаточно для определения всего процесса движения жидкости в случае малых возмущений, так как

$$\bar{v} = \operatorname{grad} \tilde{\Psi}; \quad s = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial t}.$$

Найдем акустическое давление $P' = P - P_0$. Из уравнения (4), используя приближение, сделанное для (9):

$$\frac{\partial \operatorname{grad} \tilde{\Psi}}{\partial t} = -\frac{1}{p_0} \operatorname{grad} P'.$$

Занесем дифференциал под градиент и перенесем в левую часть:

$$\operatorname{grad} \left(\frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial t} + \frac{P'}{p_0} \right) = 0.$$

Выражение в скобках не зависит от координат. Учитывая, что потенциал $\tilde{\Psi}$ определяется с точностью до функции времени, приравняем выражение в скобках нулю:

$$\frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial t} + \frac{P'}{p_0} = 0.$$

В случае установившегося режима колебаний

$$\tilde{\Psi} = \Psi e^{-i\omega t} \quad (15)$$

уравнение (14) переходит в уравнение Гельмгольца

$$\Delta \Psi + k^2 \Psi = 0, \quad (16)$$

где ω — круговая частота; $k = \frac{\omega}{c}$ — волновое число. При этом акустическое давление

$$P' = -p_0 \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial t} = -p_0 \cdot (-i\omega) \Psi e^{-i\omega t} = ip_0 \omega \tilde{\Psi}.$$

1.2. Распространение звуковых волн в упругих телах

Ландау - Теория упругости, Амензаде
моделирование волновых полей

2. ДИФРАКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА УПРУГОЙ СФЕРЕ, ИМЕЮЩЕЙ ПРОИЗВОЛЬНО РАСПОЛОЖЕННУЮ ПОЛОСТЬ И НЕОДНОРОДНОЕ ПОКРЫТИЕ

2.1. Обзор литературы по проблеме исследования

Известия ТулГУ №3 Ларин; статьи Толоконникова

Исследованию дифракции гармонических звуковых волн на упругих однородных изотропных сплошных сферических телах и сферических оболочках, находящихся в жидкости, посвящена обширная литература.

Первыми работами о дифракции звука на упругих телах сферической формы были работы. В работе рассмотрено рассеяние плоских волн сплошным шаром. В изучено рассеяние плоской волны тонкой сферической оболочкой, описанной по безмоментной теории.

В приведено решение задачи рассеяния плоской звуковой волны сплошным упругим шаром и вычислена сила, действующая на шар.

Результаты экспериментов по исследованию резонансных явлений при рассеянии звука шарами, изготовленными из различных материалов, приведены в .

Исследованию обратного рассеяния плоской волны на металлической сфере, помещенной в жидкость, посвящена работа.

В описываются результаты теоретических исследований рассеяния звука в воде сферическими телами из силиконовой резины.

Резонансные явления, возникающие при падении плоской звуковой волны на шар, изучены в .

В для исследования рассеяния звука упругими сферами, погруженными в жидкость, использована резонансная теория.

Задача дифракции плоской звуковой волны на полый упругой сфере решена в . Сферическая оболочка произвольной толщины рассматривалась по трехмерной теории упругости.

Отражение плоских звуковых волн от полых упругих сфер, находящихся в воде и в воздухе, рассмотрено в работах . Исследовано влияние наличия или отсутствия заполнителя внутри сферы, а также толщины оболочки на эхо-сигнал. Рассчитана зависимость интенсивности отраженной волны вдали от облучаемой сферы от частоты для тонкой алюминиевой сферической оболочки и полиэтиленовых оболочек различной толщины. Результаты расчетов показывают, что интенсивность отраженной волны в широком диапазоне частот существенно зависит от отношения толщины оболочки к ее внешнему радиусу и от упругих свойств материала оболочки.

Сопоставление численных и экспериментальных результатов исследования эхо-сигналов от полых алюминиевых сфер в воде проведено в .

В работе изучено рассеяние плоской звуковой волны тонкой упругой сферической оболочкой.

Рассеяние сферических звуковых волн упругими сферическими оболочками рассматривалось в работах.

В с помощью метода Ватсона исследовано рассеянное акустическое поле упругой сферической оболочкой, рассматриваемой по теории типа Тимошенко. Определены вклады отдельных мод в полный эхо-сигнал в дальней зоне поля. В вычислены акустические поля, рассеянные сферической оболочкой, с использованием различных теорий оболочек (теория типа Тимошенко, теория Кирхгоффа — Лява и безмоментная теория), и проведено сравнение полученных результатов с соответствующими результатами, полученными для сферической оболочки, описываемой по линейной теории упругости. Показано, что для тонких оболочек при невысоких частотах применение теорий оболочек оправдано.

Дифракция сферической звуковой волны на упругой сферической оболочке изучалась в . Проведен теоретический анализ распределения звукового давления вблизи поверхности оболочки на расстояниях, сравнимых с ее радиусом.

Исследованию резонансного возбуждения сферической упругой оболочки, наполненной жидкостью или газом и помещенной в другую жидкость посвящена работа. Для изучения рассеяния оболочкой плоской звуковой волны используется теория резонансного рассеяния. Анализируется акустическое поле, рассеянное алюминиевой оболочкой, наполненной воздухом и находящейся в воде.

В работе решены задачи о дифракции плоской и сферической звуковых волн на пронизываемом (жидком) шаре с неконцентрическим шаровым включением. При этом граница полости рассматривалась акустически мягкой или акустически жесткой.

Дифракция звука на упругих сферических телах с произвольно расположенными сферическими полостями изучалась в работах .

2.2. Постановка задачи



Рис. 1: «Сфера со сферическим слоем и произвольно расположенной сферической полостью»

Рассмотрим изотропный однородный упругий шар радиуса R_{\odot} , плотность материала которого ρ_{\odot} , упругие постоянные λ_{\odot} и μ_{\odot} , содержащий произвольно расположенную сферическую полость с радиусом R_{\circ} . Шар имеет покрытие в виде неоднородного изотропного упругого слоя, внешний радиус которого равен R_{\odot} (рис. 1).

Свяжем с полостью тела и с самим телом прямоугольные системы координат $x_{\circ}, y_{\circ}, z_{\circ}$ и $x_{\odot}, y_{\odot}, z_{\odot}$ соответственно так, чтобы соответствующие оси обеих систем координат были параллельны. С декартовыми системами координат $x_{\circ}, y_{\circ}, z_{\circ}$ и $x_{\odot}, y_{\odot}, z_{\odot}$ свяжем сферические координаты $r_{\circ}, \theta_{\circ}, \varphi_{\circ}$ и $r_{\odot}, \theta_{\odot}, \varphi_{\odot}$.

Пусть модули упругости λ_{\odot} и μ_{\odot} материала слоя описываются дифференцируемыми функциями радиальной координаты r_{\odot} сферической системы координат $(r_{\odot}, \theta_{\odot}, \varphi_{\odot})$, а плотность ρ_{\odot} — непрерывной функцией координаты r_{\odot} . Окружающая тело и находящаяся в его полости жидкости — идеальные и однородные, имеющие плотности ρ_e, ρ_{\circ} и скорости звука c_e, c_{\circ} соответственно.

Определим отраженные от тела и возбужденные в его полости волны, а также найдем поля смещений в упругом материале шара и неоднородном слое.

2.3. Аналитическое решение задачи

Пусть из внешнего пространства на шар падает плоская звуковая волна. Потенциал скоростей гармонической падающей волны запишем в виде:

$$\Psi_o(\bar{x}_\odot, t) = A_o \exp [i (\bar{k}_e \cdot \bar{x}_\odot - \omega t)], \quad (17)$$

где A_o — амплитуда волны,

\bar{k}_e — волновой вектор в окружающей жидкости,

$|\bar{k}_e| = k_e = \omega/c_e$ — волновое число,

\bar{x}_\odot — радиус-вектор,

ω — круговая частота.

Без ограничения общности будем полагать, что волна распространяется в направлении $\theta_\odot = \theta_o = 0$. Тогда в сферической системе координат (17) запишется в виде:

$$\Psi_o(r_\odot, \theta_\odot, t) = A_o \exp [i (k_e r_\odot \cos \theta_\odot - \omega t)], \quad (18)$$

В дальнейшем временной множитель $\exp(-i\omega t)$ будем опускать.

Разложим (18) в ряд по ортогональным функциям:

$$\Psi_o(r_\odot, \theta_\odot, f_\odot) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{omn} j_n(k_e r_\odot) P_n^m(\cos \theta_\odot) e^{im\varphi_\odot}, \quad (19)$$

где $j_n(x)$ — сферическая функция Бесселя порядка n ;

$P_n^m(x)$ — присоединенный многочлен Лежандра степени n порядка m ;

$$A_{omn} = \begin{cases} A_o i^n (2n+1), & \text{при } m = 0; \\ 0, & \text{при } m \neq 0. \end{cases}$$

Задача определения акустических полей вне упругого тела и внутри его полости в установившемся режиме колебаний заключается в нахождении решений уравнения Гельмгольца:

$$\Delta \Psi_e + k_e^2 \Psi_e = 0; \quad (20)$$

$$\Delta \Psi_o + k_o^2 \Psi_o = 0, \quad (21)$$

где Ψ_e — потенциал скоростей полного акустического поля во внешней среде;

Ψ_o — потенциал скоростей акустического поля в полости тела;

$k_o = \frac{\omega}{c_o}$ — волновое число находящейся в полости жидкости.

При этом скорости частиц жидкости и акустическое давление вне тела и внутри полости определяются по следующим формулам соответственно:

$$\bar{v}_e = \text{grad } \Psi_e; \quad P_e = ip_e \omega \Psi_e; \quad (22)$$

$$\bar{v}_o = \text{grad } \Psi_o; \quad P_o = ip_o \omega \Psi_o. \quad (23)$$

В силу линейной постановки задачи для Ψ_e и Ψ_o справедливо

$$\Psi_e = \Psi_o + \Psi_s, \quad (24)$$

где Ψ_s — потенциал скоростей рассеянной звуковой волны.

Тогда из (20) получаем уравнение для нахождения Ψ_s :

$$\Delta \Psi_s + k_e^2 \Psi_s = 0. \quad (25)$$

Из-за произвольного расположения полости в теле потенциалы Ψ_o и Ψ_s не будут проявлять свойства симметрии. Уравнения (21) и (25) запишем в сферических системах координат $(r_o, \theta_o, \varphi_o)$ и $(r_\odot, \theta_\odot, \varphi_\odot)$ соответственно:

$$\frac{1}{r_o^2} \frac{\partial}{\partial r_o} \left(r_o^2 \frac{\partial \Psi_o}{\partial r_o} \right) + \frac{1}{r_o^2 \sin^2 \theta_o} \frac{\partial \Psi_o}{\partial \varphi_o^2} + \frac{1}{r_o^2 \sin \theta_o} \frac{\partial}{\partial \theta_o} \left(\sin \theta_o \frac{\partial \Psi_o}{\partial \theta_o} \right) + k_o^2 \Psi_o = 0; \quad (26)$$

$$\frac{1}{r_\odot^2} \frac{\partial}{\partial r_\odot} \left(r_\odot^2 \frac{\partial \Psi_s}{\partial r_\odot} \right) + \frac{1}{r_\odot^2 \sin^2 \theta_\odot} \frac{\partial \Psi_s}{\partial \varphi_\odot^2} + \frac{1}{r_\odot^2 \sin \theta_\odot} \frac{\partial}{\partial \theta_\odot} \left(\sin \theta_\odot \frac{\partial \Psi_s}{\partial \theta_\odot} \right) + k_e^2 \Psi_s = 0. \quad (27)$$

Звуковая волна в полости тела Ψ_o должна удовлетворять условию ограниченности, а отраженная волна Ψ_s — условиям излучения на бесконечности. Поэтому потенциалы Ψ_s и Ψ_o будем искать в виде рядов по сферическим функциям:

$$\Psi_s(r_\odot, \theta_\odot, \varphi_\odot) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{smn} h_n(k_e r_\odot) P_n^m(\cos \theta_\odot) e^{im\varphi_\odot}; \quad (28)$$

$$\Psi_o(r_o, \theta_o, \varphi_o) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n B_{omn} j_n(k_o r_o) P_n^m(\cos \theta_o) e^{im\varphi_o}, \quad (29)$$

где $h_n(x)$ — сферическая функции Ханкеля первого рода.

Распространение малых возмущений в упругом теле для установившегося режима движения частиц тела описывается скалярным и векторным уравнени-

ем Гельмгольца:

$$\Delta \Psi_{\odot} + k_{\odot l}^2 \Psi_{\odot} = 0; \quad (30)$$

$$\Delta \bar{\Phi}_{\odot} + k_{\odot \tau}^2 \bar{\Phi}_{\odot} = 0, \quad (31)$$

где $k_{\odot l}$ — волновое число продольных волн со скоростью распространения

$$c_{\odot l} = \sqrt{\frac{(\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot})}{\rho_{\odot}}};$$

$k_{\odot \tau}$ — волновое число поперечных волн со скоростью распространения

$$c_{\odot \tau} = \sqrt{\frac{\mu_{\odot}}{\rho_{\odot}}};$$

Ψ_{\odot} и $\bar{\Phi}_{\odot}$ — скалярной и векторный потенциалы смещения соответственно.

Вектор смещения \bar{u}_{\odot} частиц упругого тела определяется по формуле

$$\bar{u}_{\odot} = \text{grad } \Psi_{\odot} + \text{rot } \bar{\Phi}_{\odot}.$$

Потенциал смещения Ψ_{\odot} будем искать в виде ряда по двум локальным сферическим функциям:

$$\begin{aligned} \Psi_{\odot} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{\odot mn} h_n(k_{\odot l} r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}} + \\ + B_{\odot mn} j_n(k_{\odot l} r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}} \end{aligned} \quad (32)$$

Векторный потенциал $\bar{\Phi}_{\odot}$ может быть представлен в виде суммы:

$$\bar{\Phi}_{\odot} = rV\bar{e}_r + \text{rot}(rW\bar{e}_r),$$

где \bar{e}_r — орт координатной оси r_{\odot} сферической системы координат $r_{\odot}, \theta_{\odot}, \varphi_{\odot}$, функции V и W удовлетворяют скалярным уравнениям Гельмгольца

$$\Delta V + k_{\odot \tau}^2 V = 0, \quad (33)$$

$$\Delta W + k_{\odot \tau}^2 W = 0. \quad (34)$$

Компоненты вектора \bar{u}_{\odot} выражаются через функции Ψ_{\odot}, V и W следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{\odot r} &= \frac{\partial \Psi_{\odot}}{\partial r_{\odot}} - \frac{1}{r_{\odot}} L(W), \\ u_{\odot \theta} &= \frac{1}{r_{\odot}} \frac{\partial \Psi_{\odot}}{\partial \theta_{\odot}} + \frac{1}{r_{\odot}} \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} \left(r_{\odot} \frac{\partial W}{\partial \theta_{\odot}} \right) + \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial V}{\partial \varphi_{\odot}}, \\ u_{\odot \varphi} &= \frac{1}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial \Psi_{\odot}}{\partial \varphi_{\odot}} + \frac{1}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} \left(r_{\odot} \frac{\partial W}{\partial \varphi_{\odot}} \right) - \frac{\partial V}{\partial \theta_{\odot}}, \end{aligned} \quad (35)$$

где $L = \frac{\partial^2}{\partial \theta_\odot^2} + \text{ctg } \theta_\odot \frac{\partial}{\partial \theta_\odot} + \frac{1}{\sin^2 \theta_\odot} \frac{\partial^2}{\partial \varphi_\odot^2}$.

Функции V и W будем искать в виде:

$$V = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n C_{\odot mn} h_n(k_{\odot \tau} r_\odot) P_n^m(\cos \theta_\odot) e^{im\varphi_\odot} + D_{\odot mn} j_n(k_{\odot \tau} r_\odot) P_n^m(\cos \theta_\odot) e^{im\varphi_\odot}, \quad (36)$$

$$W = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n E_{\odot mn} h_n(k_{\odot \tau} r_\odot) P_n^m(\cos \theta_\odot) e^{im\varphi_\odot} + F_{\odot mn} j_n(k_{\odot \tau} r_\odot) P_n^m(\cos \theta_\odot) e^{im\varphi_\odot}. \quad (37)$$

Распространение упругих волн в неоднородном слое описывается общими уравнениями движения упругой среды, которые для установившегося режима движения в сферической системе координат имеют следующий вид [?]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \sigma_{\odot rr}}{\partial r_\odot} + \frac{1}{r_\odot} \frac{\partial \sigma_{\odot r\theta}}{\partial \theta_\odot} + \frac{1}{r_\odot \sin \theta_\odot} \frac{\partial \sigma_{\odot r\varphi}}{\partial \varphi_\odot} + \\ & + \frac{1}{r_\odot} \left(2\sigma_{\odot rr} - \sigma_{\odot \theta\theta} - \sigma_{\odot \varphi\varphi} + \sigma_{\odot r\theta} \text{ctg } \theta_\odot \right) = -p_\odot \omega^2 u_{\odot r}; \\ & \frac{\partial \sigma_{\odot r\theta}}{\partial r_\odot} + \frac{1}{r_\odot} \frac{\partial \sigma_{\odot \theta\theta}}{\partial \theta_\odot} + \frac{1}{r_\odot \sin \theta_\odot} \frac{\partial \sigma_{\odot \theta\varphi}}{\partial \varphi_\odot} + \\ & + \frac{1}{r_\odot} \left((\sigma_{\odot \theta\theta} - \sigma_{\odot \varphi\varphi}) \text{ctg } \theta_\odot + 3\sigma_{\odot r\theta} \right) = -p_\odot \omega^2 u_{\odot \theta}; \\ & \frac{\partial \sigma_{\odot r\varphi}}{\partial r_\odot} + \frac{1}{r_\odot} \frac{\partial \sigma_{\odot \theta\varphi}}{\partial \theta_\odot} + \frac{1}{r_\odot \sin \theta_\odot} \frac{\partial \sigma_{\odot \varphi\varphi}}{\partial \varphi_\odot} + \\ & + \frac{1}{r_\odot} \left(3\sigma_{\odot r\varphi} + 2\sigma_{\odot \theta\varphi} \text{ctg } \theta_\odot \right) = -p_\odot \omega^2 u_{\odot \varphi}, \end{aligned} \quad (38)$$

где $u_{\odot r}, u_{\odot \theta}, u_{\odot \varphi}$ — компоненты вектора смещения \bar{u}_\odot ;

$\sigma_{\odot ij}$ — компоненты тензора напряжений неоднородной среды в сферической системе координат.

Используя связь компонентов тензора напряжений с компонентами тензора деформаций (обобщенный закон Гука), а также выражения компонентов тензора деформаций через компоненты вектора смещения [?], получаем в сфе-

рической системе координат следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
\sigma_{\odot rr} &= \left(\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot} \right) \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}} + \\
&+ \frac{\lambda_{\odot}}{r_{\odot}} \left(2u_{\odot r} + \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial \theta_{\odot}} + \operatorname{ctg} \theta_{\odot} u_{\odot \theta} + \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial \varphi_{\odot}} \right); \\
\sigma_{\odot \theta \theta} &= \lambda_{\odot} \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}} + \frac{2(\lambda_{\odot} + \mu_{\odot})}{r_{\odot}} u_{\odot r} + \frac{\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial \theta_{\odot}} + \\
&+ \frac{\lambda_{\odot}}{r_{\odot}} \left(\operatorname{ctg} \theta_{\odot} u_{\odot \theta} + \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial \varphi_{\odot}} \right); \\
\sigma_{\odot \varphi \varphi} &= \lambda_{\odot} \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}} + \frac{2(\lambda_{\odot} + \mu_{\odot})}{r_{\odot}} u_{\odot r} + \frac{\lambda_{\odot}}{r_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial \theta_{\odot}} + \\
&+ \frac{\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \left(\operatorname{ctg} \theta_{\odot} u_{\odot \theta} + \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial \varphi_{\odot}} \right); \\
\sigma_{\odot r \theta} &= \mu_{\odot} \left(\frac{1}{r_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial \theta_{\odot}} - \frac{u_{\odot \theta}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial r_{\odot}} \right); \\
\sigma_{\odot r \varphi} &= \mu_{\odot} \left(\frac{1}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial \varphi_{\odot}} - \frac{u_{\odot \varphi}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial r_{\odot}} \right); \\
\sigma_{\odot \theta \varphi} &= \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \left(\frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial \varphi_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial \theta_{\odot}} - \operatorname{ctg} \theta_{\odot} u_{\odot \varphi} \right).
\end{aligned} \tag{39}$$

Соотношения (39) справедливы как для однородной упругой среды, так и для неоднородного слоя. В первом случае в выражениях (39) компоненты вектора смещения \bar{u}_{\odot} и тензора напряжений σ_{\odot} , а также величины λ_{\odot} и μ_{\odot} следует заменить на $\bar{u}_{\odot}, \sigma_{\odot}, \lambda_{\odot}$ и μ_{\odot} соответственно.

Используя эти соотношения, запишем уравнения (38) через компоненты вектора смещения \bar{u}_{\odot} :

$$\begin{aligned}
&\left(\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot} \right) \frac{\partial^2 u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}^2} + \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\partial^2 u_{\odot r}}{\partial \theta_{\odot}^2} + \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot r}}{\partial \varphi_{\odot}^2} + \frac{\mu_{\odot} \operatorname{ctg} \theta_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial \theta_{\odot}} + \\
&+ \left(\lambda'_{\odot} + 2\mu'_{\odot} + \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right) \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}} + \left(\frac{2\lambda'_{\odot}}{r_{\odot}} - \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \right) u_{\odot r} + \\
&+ \frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot \theta}}{\partial r_{\odot} \partial \theta_{\odot}} + \frac{(\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}) \operatorname{ctg} \theta_{\odot}}{r_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial r_{\odot}} + \\
&+ \left(\frac{\lambda'_{\odot}}{r_{\odot}} - \frac{\lambda_{\odot} + 3\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \right) \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial \theta_{\odot}} + \left(\frac{\lambda'_{\odot} \operatorname{ctg} \theta_{\odot}}{r_{\odot}} - \frac{(\lambda_{\odot} + 3\mu_{\odot}) \operatorname{ctg} \theta_{\odot}}{r_{\odot}^2} \right) u_{\odot \theta} + \\
&+ \frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot \varphi}}{\partial r_{\odot} \partial \varphi_{\odot}} + \left(\frac{\lambda'_{\odot}}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} - \frac{\lambda_{\odot} + 3\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin \theta_{\odot}} \right) \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial \varphi_{\odot}} = -p_{\odot} \omega^2 u_{\odot r};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot r}}{\partial r_{\odot} \partial \theta_{\odot}} + \left(\frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \right) \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial \theta_{\odot}} + \\
& + \mu_{\odot} \frac{\partial^2 u_{\odot \theta}}{\partial r_{\odot}^2} + \frac{\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\partial^2 u_{\odot \theta}}{\partial \theta_{\odot}^2} + \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin^2 \theta_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot \theta}}{\partial \varphi_{\odot}^2} + \\
& + \left(\mu'_{\odot} + \frac{2\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right) \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial r_{\odot}} + \frac{(\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}) \operatorname{ctg} \theta_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial \theta_{\odot}} - \left(\frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + \frac{\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin^2 \theta_{\odot}} \right) u_{\odot \theta} + \\
& + \frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot \varphi}}{\partial \theta_{\odot} \partial \varphi_{\odot}} - \frac{(\lambda_{\odot} + 3\mu_{\odot}) \operatorname{ctg} \theta_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial \varphi_{\odot}} = -p_{\odot} \omega^2 u_{\odot \theta};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot r}}{\partial r_{\odot} \partial \varphi_{\odot}} + \left(\frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} + \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin \theta_{\odot}} \right) \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial \varphi_{\odot}} + \\
& + \frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot \theta}}{\partial \theta_{\odot} \partial \varphi_{\odot}} + \frac{(\lambda_{\odot} + 3\mu_{\odot}) \operatorname{ctg} \theta_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot \theta}}{\partial \varphi_{\odot}} + \\
& + \mu_{\odot} \frac{\partial^2 u_{\odot \varphi}}{\partial r_{\odot}^2} + \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\partial^2 u_{\odot \varphi}}{\partial \theta_{\odot}^2} + \frac{\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin^2 \theta_{\odot}} \frac{\partial^2 u_{\odot \varphi}}{\partial \varphi_{\odot}^2} + \\
& + \left(\mu'_{\odot} + \frac{2\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right) \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial r_{\odot}} + \frac{\mu_{\odot} \operatorname{ctg} \theta_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\partial u_{\odot \varphi}}{\partial \theta_{\odot}} - \left(\frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin^2 \theta_{\odot}} \right) u_{\odot \varphi} = -p_{\odot} \omega^2 u_{\odot \varphi}.
\end{aligned}$$

Введем новые функции $u_{\odot 2}$ и $u_{\odot 3}$, связанные с $u_{\odot \theta}$ и $u_{\odot \varphi}$ следующими соотношениями:

$$u_{\odot \theta} = \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial \theta_{\odot}} + \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial \varphi_{\odot}}; \quad u_{\odot \varphi} = \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial \varphi_{\odot}} - \frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial \theta_{\odot}}, \quad (40)$$

запишем уравнения движения через функции $u_{\odot r}$, $u_{\odot 2}$ и $u_{\odot 3}$ и перенесем всё в левую часть:

$$\begin{aligned}
& \left(\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot} \right) \frac{\partial^2 u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}^2} + \left(\lambda'_{\odot} + 2\mu'_{\odot} + \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right) \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}} + \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} L(u_{\odot r}) + \\
& + \left(\frac{2\lambda'_{\odot}}{r_{\odot}} - \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} + p_{\odot} \omega^2 \right) u_{\odot r} + \\
& + \left[\frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot}} \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} + \frac{\lambda'_{\odot}}{r_{\odot}} - \frac{\lambda_{\odot} + 3\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \right] L(u_{\odot 2}) = 0;
\end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot}} \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} + \frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \right] \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial \theta_{\odot}} + \frac{\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} L(u_{\odot 2}) + \\
& + \left[\mu_{\odot} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot}^2} + \left(\mu'_{\odot} + \frac{2\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right) \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} - \frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + p_{\odot} \omega^2 \right] \left[\frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial \theta_{\odot}} + \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial \varphi_{\odot}} \right] + \\
& + \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} L(u_{\odot 3}) = 0;
\end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} \left[\left(\lambda_{\odot} + \mu_{\odot} \right) \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} + \mu'_{\odot} + \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right] \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial \varphi_{\odot}} + \\
& + \left[\mu_{\odot} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot}^2} + \left(\mu'_{\odot} + \frac{2\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right) \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} - \frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + p_{\odot} \omega^2 \right] \left[\frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial \varphi_{\odot}} - \frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial \theta_{\odot}} \right] + \\
& + \frac{\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2 \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} L(u_{\odot 2}) - \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} L(u_{\odot 3}) = 0,
\end{aligned} \tag{43}$$

где $\lambda'_{\odot} = \frac{d\lambda_{\odot}}{dr_{\odot}}$, $\mu'_{\odot} = \frac{d\mu_{\odot}}{dr_{\odot}}$.

Получим преобразование системы уравнений, имеющей специальный вид. Пусть система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial A}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial B}{\partial \varphi} &= 0; \\
-\frac{\partial B}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A}{\partial \varphi} &= 0,
\end{aligned} \tag{44}$$

Первое уравнение системы домножим на $\sin(\theta_{\odot})$ и продифференцируем по θ_{\odot} , а второе уравнение — продифференцируем по φ_{\odot} . Сложим полученные уравнения и разделим на $\sin(\theta_{\odot})$. Получим следующее уравнение:

$$L(A) = 0.$$

Теперь продифференцируем первое уравнение системы по φ_{\odot} и вычтем второе уравнение, предварительно умноженное на $\sin(\theta_{\odot})$ и продифференцированное по θ_{\odot} , а затем всё разделим на $\sin(\theta_{\odot})$. Получим следующее уравнение:

$$L(B) = 0.$$

Таким образом, преобразование системы (44) выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial B}{\partial \varphi} = 0 \\ -\frac{\partial B}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A}{\partial \varphi} = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} L(A) = 0 \\ L(B) = 0 \end{array} \right. \tag{45}$$

Данное преобразование уравнений позволяет устранить связь между функциями A и B .

Применим преобразование (45) к уравнениям (42) и (43). Получим следу-

ющие уравнения:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\lambda_{\odot} + \mu_{\odot}}{r_{\odot}} \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} + \frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + \frac{2\lambda_{\odot} + 4\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \right] L(u_{\odot r}) + \\ & \left[\mu_{\odot} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot}^2} + \left(\mu'_{\odot} + \frac{2\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right) \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} - \frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + p_{\odot} \omega^2 \right] L(u_{\odot 2}) + \\ & + \frac{\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} L^2(u_{\odot 2}) = 0, \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} & \left[\mu \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot}^2} + \left(\mu'_{\odot} + \frac{2\mu_{\odot}}{r_{\odot}} \right) \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} - \frac{\mu'_{\odot}}{r_{\odot}} + p_{\odot} \omega^2 \right] L(u_{\odot 3}) + \\ & \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} L^2(u_{\odot 3}) = 0. \end{aligned} \quad (47)$$

В результате получили систему, состоящую из уравнений (41), (46) и (47).

Функции $u_{\odot r}$, $u_{\odot 2}$ и $u_{\odot 3}$ также будем искать в виде разложений по сферическим функциям:

$$\begin{aligned} u_{\odot r}(r_{\odot}, \theta_{\odot}, \varphi_{\odot}) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n U_{1mn}(r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}}, \\ u_{\odot 2}(r_{\odot}, \theta_{\odot}, \varphi_{\odot}) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n U_{2mn}(r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}}, \\ u_{\odot 3}(r_{\odot}, \theta_{\odot}, \varphi_{\odot}) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n U_{3mn}(r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}}. \end{aligned} \quad (48)$$

Коэффициенты A_{smn} , $B_{\odot mn}$, $A_{\odot mn}$, $B_{\odot mn}$, $C_{\odot mn}$, $D_{\odot mn}$, $E_{\odot mn}$ и $F_{\odot mn}$ разложений (28), (29), (32), (36) и (37), а также функции U_{1mn} , U_{2mn} и U_{3mn} из разложений (48) подлежат определению из граничных условий, которые заключаются в равенстве нормальных скоростей частиц упругой среды и жидкости на внешней поверхности слоя и внутренней поверхности полого шара; равенстве на них нормального напряжения и акустического давления; отсутствии на этих поверхностях касательных напряжений. На внутренней поверхности слоя при переходе через границу раздела упругих сред должны быть непрерывны составляющие вектора смещения частиц, а также нормальные и тангенциальные

напряжения. Имеем:

$$\begin{aligned} \text{при } r_{\odot} = R_{\odot} : \quad & \sigma_{\odot rr} = -P_{\odot}, \quad \sigma_{\odot r\theta} = 0, \quad \sigma_{\odot r\varphi} = 0, \\ & -i\omega u_{\odot r} = v_{or}; \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \text{при } r_{\odot} = R_{\odot} : \quad & \sigma_{\odot rr} = \sigma_{\odot rr}, \quad \sigma_{\odot r\theta} = \sigma_{\odot r\theta}, \quad \sigma_{\odot r\varphi} = \sigma_{\odot r\varphi}, \\ & u_{\odot r} = u_{\odot r}, \quad u_{\odot \theta} = u_{\odot \theta}, \quad u_{\odot \varphi} = u_{\odot \varphi}; \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \text{при } r_{\odot} = R_{\odot} : \quad & \sigma_{\odot rr} = -P_e, \quad \sigma_{\odot r\theta} = 0, \quad \sigma_{\odot r\varphi} = 0, \\ & -i\omega u_{\odot r} = v_{er}, \end{aligned} \quad (51)$$

где $v_{or} = \partial\Psi_{\odot}/\partial r$, $v_{er} = \partial\Psi_e/\partial r$ — радиальная компонента скорости частиц в жидкости внутри полости \bar{v}_{\odot} и в окружающем пространстве \bar{v}_e соответственно.

Используя выражения (22), (39) и (40), запишем граничные условия (51) через функции $\Psi_o, \Psi_s, u_{\odot r}, u_{\odot 2}$ и $u_{\odot 3}$. Получим для $r_{\odot} = R_{\odot}$:

$$\left(\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot} \right) \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}} + \frac{2\lambda_{\odot}}{r_{\odot}} u_{\odot r} + \frac{\lambda_{\odot}}{r_{\odot}} L(u_{\odot 2}) = -ip_e \omega (\Psi_o + \Psi_s); \quad (52)$$

$$\mu_{\odot} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} \left(\frac{u_{\odot r} - u_{\odot 2}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial r_{\odot}} \right) + \frac{\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial r_{\odot}} - \frac{u_{\odot 3}}{r_{\odot}} \right) = 0; \quad (53)$$

$$\frac{\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{u_{\odot r} - u_{\odot 2}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial r_{\odot}} \right) - \mu_{\odot} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} \left(\frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial r_{\odot}} - \frac{u_{\odot 3}}{r_{\odot}} \right) = 0; \quad (54)$$

$$-i\omega u_{\odot r} = \frac{\partial(\Psi_o + \Psi_s)}{\partial r_{\odot}}. \quad (55)$$

Рассмотрим уравнения (53) и (54). Применим к ним преобразование (45). Получим следующие уравнения:

$$\mu_{\odot} L \left(\frac{u_{\odot r} - u_{\odot 2}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial r_{\odot}} \right) \Big|_{r_{\odot}=R_{\odot}} = 0. \quad (56)$$

$$\mu_{\odot} L \left(\frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial r_{\odot}} - \frac{u_{\odot 3}}{r_{\odot}} \right) \Big|_{r_{\odot}=R_{\odot}} = 0. \quad (57)$$

Аналогично, используя выражения (35), (39) и (40), запишем граничные

условия (50) через функции $u_{\odot r}, u_{\odot 2}, u_{\odot 3}, \Psi_{\odot}, V$ и W . Для $r_{\odot} = R_{\odot}$ получим:

$$\begin{aligned} & \left(\lambda_{\odot} + 2\mu_{\odot} \right) \frac{\partial u_{\odot r}}{\partial r_{\odot}} + \frac{2\lambda_{\odot}}{r_{\odot}} u_{\odot r} + \frac{\lambda_{\odot}}{r_{\odot}} L(u_{\odot 2}) = \\ & = \frac{\lambda_{\odot}}{r_{\odot}^2} \left(\frac{\partial}{\partial r_{\odot}} \left(r_{\odot}^2 \frac{\partial \Psi_{\odot}}{\partial r_{\odot}} \right) + L(\Psi_{\odot}) \right) + 2\mu_{\odot} \left(\frac{\partial^2 \Psi_{\odot}}{\partial r_{\odot}^2} - \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} \left(\frac{L(W)}{r_{\odot}} \right) \right); \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} & \mu_{\odot} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} \left(\frac{u_{\odot r} - u_{\odot 2}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial r_{\odot}} \right) + \frac{\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial r_{\odot}} - \frac{u_{\odot 3}}{r_{\odot}} \right) = \\ & = 2\mu_{\odot} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot} \partial \theta_{\odot}} \left(\frac{\Psi_{\odot}}{r_{\odot}} \right) + \mu_{\odot} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r_{\odot}^2} - \frac{L(W) + 2W}{r_{\odot}^2} \right) + \\ & + \frac{\mu_{\odot} r_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot} \partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{V}{r_{\odot}} \right) \\ & \frac{\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{u_{\odot r} - u_{\odot 2}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial r_{\odot}} \right) - \mu_{\odot} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} \left(\frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial r_{\odot}} - \frac{u_{\odot 3}}{r_{\odot}} \right) = \\ & = \frac{2\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot} \partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{\Psi_{\odot}}{r_{\odot}} \right) + \frac{\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r_{\odot}^2} - \frac{L(W) + 2W}{r_{\odot}^2} \right) - \\ & - \mu_{\odot} r_{\odot} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot} \partial \theta_{\odot}} \left(\frac{V}{r_{\odot}} \right) \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{u_{\odot r} - u_{\odot 2}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial r_{\odot}} \right) - \mu_{\odot} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} \left(\frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial r_{\odot}} - \frac{u_{\odot 3}}{r_{\odot}} \right) = \\ & = \frac{2\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot} \partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{\Psi_{\odot}}{r_{\odot}} \right) + \frac{\mu_{\odot}}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r_{\odot}^2} - \frac{L(W) + 2W}{r_{\odot}^2} \right) - \\ & - \mu_{\odot} r_{\odot} \frac{\partial^2}{\partial r_{\odot} \partial \theta_{\odot}} \left(\frac{V}{r_{\odot}} \right) \end{aligned} \quad (60)$$

$$u_{\odot r} = \frac{\partial \Psi_{\odot}}{\partial r_{\odot}} - \frac{1}{r_{\odot}} L(W), \quad (61)$$

$$\frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial \theta_{\odot}} + \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial \varphi_{\odot}} = \frac{1}{r_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \theta_{\odot}} \left(\Psi_{\odot} + \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} (r_{\odot} W) \right) + \frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial V}{\partial \varphi_{\odot}}, \quad (62)$$

$$\frac{1}{\sin \theta_{\odot}} \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial \varphi_{\odot}} - \frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial \theta_{\odot}} = \frac{1}{r_{\odot} \sin \theta_{\odot}} \frac{\partial}{\partial \varphi_{\odot}} \left(\Psi_{\odot} + \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} (r_{\odot} W) \right) - \frac{\partial V}{\partial \theta_{\odot}}, \quad (63)$$

Рассмотрим уравнения (59) и (60), а также уравнения (62) и (63). Применим к ним преобразование (45). Получим следующие уравнения:

$$\mu_{\odot} L \left(\frac{u_{\odot r} - u_{\odot 2}}{r_{\odot}} + \frac{\partial u_{\odot 2}}{\partial r_{\odot}} \right) = \mu_{\odot} L \left(2 \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} \left(\frac{\Psi_{\odot}}{r_{\odot}} \right) + \frac{\partial^2 W}{\partial r_{\odot}^2} - \frac{L(W) + 2W}{r_{\odot}^2} \right); \quad (64)$$

$$\mu_{\odot} L \left(\frac{\partial u_{\odot 3}}{\partial r_{\odot}} - \frac{u_{\odot 3}}{r_{\odot}} \right) = \mu_{\odot} r_{\odot} \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} L \left(\frac{V}{r_{\odot}} \right); \quad (65)$$

$$L(u_{\odot 2}) = \frac{1}{r_{\odot}} L \left(\Psi_{\odot} + \frac{\partial}{\partial r_{\odot}} (r_{\odot} W) \right); \quad (66)$$

$$L(u_{\odot 3}) = L(V). \quad (67)$$

Запишем граничные условия (49) через $\Psi_{\odot}, \Psi_{\odot}, V$ и W , используя выраже-

ния (23), (35) и (39). Для $r_o = R_o$ получим:

$$\frac{\lambda_o}{r_o^2} \left(\frac{\partial}{\partial r_o} \left(r_o^2 \frac{\partial \Psi_o}{\partial r_o} \right) + L(\Psi_o) \right) + 2\mu_o \left(\frac{\partial^2 \Psi_o}{\partial r_o^2} - \frac{\partial}{\partial r_o} \left(\frac{L(W)}{r_o} \right) \right) =$$

$$= -ip_o \omega \Psi_o;$$

$$2\mu_o \frac{\partial^2}{\partial r_o \partial \theta_o} \left(\frac{\Psi_o}{r_o} \right) + \mu_o \frac{\partial}{\partial \theta_o} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r_o^2} - \frac{L(W) + 2W}{r_o^2} \right) +$$

$$+ \frac{\mu_o r_o}{\sin \theta_o} \frac{\partial^2}{\partial r_o \partial \varphi_o} \left(\frac{V}{r_o} \right) = 0;$$

$$\frac{2\mu_o}{\sin \theta_o} \frac{\partial^2}{\partial r_o \partial \varphi_o} \left(\frac{\Psi_o}{r_o} \right) + \frac{\mu_o}{\sin \theta_o} \frac{\partial}{\partial \varphi_o} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r_o^2} - \frac{L(W) + 2W}{r_o^2} \right) -$$

$$- \mu_o r_o \frac{\partial^2}{\partial r_o \partial \theta_o} \left(\frac{V}{r_o} \right) = 0;$$

$$-i\omega \left(\frac{\partial \Psi_o}{\partial r_o} - \frac{1}{r_o} L(W) \right) = \frac{\partial \Psi_o}{\partial r_o}. \quad (71)$$

Упростим уравнение (68). Для этого уравнение (71) продифференцируем по r_o , умножим на $-2\mu_o i/\omega$ и сложим с уравнением (68). Получим следующее уравнение:

$$\frac{\lambda_o}{r_o^2} \left(\frac{\partial}{\partial r_o} \left(r_o^2 \frac{\partial \Psi_o}{\partial r_o} \right) + L(\Psi_o) \right) = -\frac{i}{\omega} \left(2\mu_o \frac{\partial^2 \Psi_o}{\partial r_o^2} + p_o \omega^2 \Psi_o \right). \quad (72)$$

Рассмотрим уравнения (69) и (70). Применим к ним преобразование (45). Получим следующие уравнения:

$$\mu_o L \left(2 \frac{\partial}{\partial r_o} \left(\frac{\Psi_o}{r_o} \right) + \frac{\partial^2 W}{\partial r_o^2} - \frac{L(W) + 2W}{r_o^2} \right) \Big|_{r_o=R_o} = 0; \quad (73)$$

$$\mu_o r_o \frac{\partial}{\partial r_o} L \left(\frac{V}{r_o} \right) \Big|_{r_o=R_o} = 0. \quad (74)$$

Анализ уравнений движения и граничных условий позволяют утверждать, что при $u_{o3} = V = 0$ будут удовлетворяться уравнения (33) и (47). а также граничные условия (57), (65), (67) и (74), где присутствует эти функции.

Таким образом,

$$C_{\odot mn} = D_{\odot mn} = U_{3mn} = 0.$$

Подставив разложения (48) в уравнения (41) и (46), воспользовавшись уравнением для присоединенных многочленов Лежандра и свойством ортогональности этих многочленов, получим для каждой пары индексов m, n ($n =$

$0, 1, \dots; |m| \leq n$) систему линейных однородных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно неизвестных функций

$U_{1mn}(r_\odot)$ и $U_{2mn}(r_\odot)$:

$$\begin{aligned} & (\lambda_\odot + 2\mu_\odot)U''_{1mn} + \\ & + \left(\lambda'_\odot + 2\mu'_\odot + \frac{2\lambda_\odot + 4\mu_\odot}{r_\odot} \right) U'_{1mn} + \left(\frac{\lambda_\odot + \mu_\odot}{r_\odot} \right) (-n(n+1))U'_{2mn} + \\ & + \left(\frac{\mu_\odot}{r_\odot^2} (-n(n+1)) + \frac{2\lambda'_\odot}{r_\odot} - \frac{2\lambda_\odot + 4\mu_\odot}{r_\odot^2} + p_\odot\omega^2 \right) U_{1mn} + \\ & + \left(\frac{\lambda'_\odot}{r_\odot} - \frac{\lambda_\odot + 3\mu_\odot}{r_\odot^2} \right) (-n(n+1))U_{2mn} = 0; \end{aligned} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} & \mu_\odot(-n(n+1))U''_{2mn} + \\ & + \frac{\lambda_\odot + \mu_\odot}{r_\odot} (-n(n+1))U'_{1mn} + \left(\mu'_\odot + \frac{2\mu_\odot}{r_\odot} \right) (-n(n+1))U'_{2mn} + \\ & + \left(\frac{\mu'_\odot}{r_\odot} + \frac{2\lambda_\odot + 4\mu_\odot}{r_\odot^2} \right) (-n(n+1))U_{1mn} + \\ & + \left(\frac{\lambda_\odot + 2\mu_\odot}{r_\odot^2} (-n(n+1)) - \frac{\mu'_\odot}{r_\odot} + p_\odot\omega^2 \right) (-n(n+1))U_{2mn} = 0. \end{aligned} \quad (76)$$

Подставим разложения (28), (29) и (48) в уравнение (55) и выразим A_{smn} :

$$A_{smn} = -\frac{i\omega U_{1mn} + k_e A_{omn} j'_n(k_e r_\odot)}{k_e h'_n(k_e r_\odot)}. \quad (77)$$

Подставим разложения (28), (29) и (48) в уравнения (52) и (56) с учетом найденного A_{smn} и значения вронскиана для сферических функций Бесселя $j_n(x)h'_n(x) - j'_n(x)h_n(x) = i/x^2$:

$$\begin{aligned} & (\lambda_\odot + 2\mu_\odot)U'_{1mn} + \left(\frac{2\lambda_\odot}{r_\odot} + \frac{p_e\omega^2 h_n(k_e r_\odot)}{k_e h'_n(k_e r_\odot)} \right) U_{1mn} + \\ & + \frac{\lambda_\odot}{r_\odot} (-n(n+1))U_{2mn} = \frac{p_e\omega A_{omn}}{(k_e r_\odot)^2 h'_n(k_e r_\odot)}; \end{aligned} \quad (78)$$

$$\mu_\odot(-n(n+1)) \left(\frac{U_{1mn} - U_{2mn}}{r_\odot} + U'_{2mn} \right) = 0. \quad (79)$$

Воспользуемся теоремы сложения для сферических волновых функций:

$$\begin{aligned} h_n(k_{\odot t} r_\odot) P_n^m(\cos \theta_\odot) e^{im\varphi_\odot} &= \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{p=-q}^q R_{tmnpq} h_q(k_{\odot t} r_\odot) P_q^{m-p}(\cos \theta_\odot) e^{i(m-p)\varphi_\odot}; \\ j_n(k_{\odot t} r_\odot) P_n^m(\cos \theta_\odot) e^{im\varphi_\odot} &= \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{p=-q}^q Q_{tmnpq} j_q(k_{\odot t} r_\odot) P_q^p(\cos \theta_\odot) e^{ip\varphi_\odot}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
R_{tmnpq} &= 2i^{q-n} \sum_{s=|q-n|}^{q+n} i^s \frac{b_q^{(nm sp)}}{N_{ps}} j_s(k_{\odot t} r_{\odot \odot}) P_s^p(\cos \theta_{\odot \odot}) e^{ip\varphi_{\odot \odot}}; \\
Q_{tmnpq} &= \frac{2i^{q-n}}{N_{pq}} \sum_{s=|q-n|}^{q+n} i^s b_s^{(nm qp)} j_s(k_{\odot t} r_{\odot \odot}) P_s^{m-p}(\cos \theta_{\odot \odot}) e^{i(m-p)\varphi_{\odot \odot}}; \\
N_{mn} &= \frac{2}{2n+1} \frac{(n+m)!}{(n-m)!}
\end{aligned}$$

чтобы привести разложения (32) и (37) к системе координат $(r_{\odot}, \theta_{\odot}, \varphi_{\odot})$ для граничных условий при $r_{\odot} = R_{\odot}$:

$$\begin{aligned}
\Psi_{\odot} &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{\odot mn} \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{p=-q}^q R_{lmnpq} h_q(k_{\odot l} r_{\odot}) P_q^{m-p}(\cos \theta_{\odot}) e^{i(m-p)\varphi_{\odot}} + \\
&\quad + B_{\odot mn} j_n(k_{\odot l} r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}};
\end{aligned} \tag{80}$$

$$\begin{aligned}
W &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n E_{\odot mn} \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{p=-q}^q R_{\tau mnpq} h_q(k_{\odot \tau} r_{\odot}) P_q^{m-p}(\cos \theta_{\odot}) e^{i(m-p)\varphi_{\odot}} + \\
&\quad + F_{\odot mn} j_n(k_{\odot \tau} r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}},
\end{aligned} \tag{81}$$

а так же к системе координат $(r_{\odot}, \theta_{\odot}, \varphi_{\odot})$ для граничных условий при $r_{\odot} = R_{\odot}$:

$$\begin{aligned}
\Psi_{\odot} &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{\odot mn} h_n(k_{\odot l} r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}} + \\
&\quad + B_{\odot mn} \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{p=-q}^q Q_{lmnpq} j_q(k_{\odot l} r_{\odot}) P_q^p(\cos \theta_{\odot}) e^{ip\varphi_{\odot}}
\end{aligned} \tag{82}$$

$$\begin{aligned}
W &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n E_{\odot mn} h_n(k_{\odot \tau} r_{\odot}) P_n^m(\cos \theta_{\odot}) e^{im\varphi_{\odot}} + \\
&\quad + F_{\odot mn} \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{p=-q}^q Q_{\tau mnpq} j_q(k_{\odot \tau} r_{\odot}) P_q^p(\cos \theta_{\odot}) e^{ip\varphi_{\odot}}
\end{aligned} \tag{83}$$

А подставив разложения (48), (80) и (81) в граничные условия (58), (61), (64) и (66), найдем оставшиеся краевые условия и сможем решить систему дифференциальных уравнений (75) и (76). После ее решения определим коэффициенты

$A_{smn}, B_{\odot mn}, A_{\odot mn}, B_{\odot mn}, E_{\odot mn}, F_{\odot mn}, U_{1mn}$ и U_{2mn} , разложений (28), (29), (32), (36), (37) и (48) для каждой пары индексов m, n , а зная коэффициенты A_{smn} , по

формуле (28) найдем акустическое поле, рассеяное упругой сферой, имеющей произвольно расположенную полость и неоднородное покрытие.

2.4. Решение краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений

3. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Диаграмма направленности

3.2. Частотные характеристики

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено .., получили.., с помощью метода .. найдена..., проведены расчеты...

ЛИТЕРАТУРА

Шендеров, Лепендин, Исакович – введение Харбенко Звук...

ПРИЛОЖЕНИЯ