

УДК: 550.341+550.834

OECD: 01.03.AA

К анализу акустического поля при рассеянии на периодически неровной границе раздела

Заславский Ю.М.^{1*}, Заславский В.Ю.²¹Д.ф.-м.н., с.н.с., в.н.с., ²К.ф.-м.н., с.н.с.^{1,2}ИПФ РАН, Н. г. Новгород, Россия

Аннотация

Представлены результаты аналитического расчета и трехмерного численного моделирования рассеяния звука, возникающего на границе двух сред с периодически рифленой (синусоидальной, гребенчатой) формой поверхности контакта и резко различающихся по звуковой скорости. Обсуждаемая проблема востребована, например, при донной сейсморазведке – исследовании характера рельефа дна на акватории. Показано, что в режиме гармонических колебаний индикатриса рассеяния имеет многолепестковую форму, а ширина лепестков определяется высотой гребня периодической структуры неровности границы. В условиях гармонического и импульсного характера колебаний рассмотрены рассеянные волны, проникающие через границу вглубь среды. На основе применения метода конечных элементов выполнено численное моделирование рассеянных гидроакустических откликов и импульсов продольных и поперечных волн, преломленных в донную толщу. Проанализированы особенности излучения, создаваемого гидроакустическими источниками вблизи границы раздела. Характерные особенности рассеяния могут быть использованы для диагностики параметров донного грунта.

Ключевые слова: отклик, рассеяние Кирхгоффа, синусоидально-гребенчатая граница, многолепестковая индикатриса, аподизация по фронту волны.

On the analysis of the acoustic field during scattering at a periodically uneven interface

Zaslavsky Yu.M.^{1*}, Zaslavsky V.Yu.²¹Doctor of Science, Leading Researcher, ²PhD, Senior researcher^{1,2}IAP RAS, N. Novgorod, Russia

Abstract

The results of analytical calculation and three-dimensional numerical simulation of sound scattering (according to Kirchhoff) occurring at the boundary of two media with a periodically grooved (sinusoidal, combed) shape of the contact surface and sharply differing in sound velocity are presented. The problem under discussion is in demand, for example, in bottom seismic exploration – the study of the nature of the bottom relief in the water area. It is shown that in the mode of harmonic oscillations, the scattering indicatrix has a multi-lobed shape, and the width of the petals is determined by the height of the ridge of the periodic structure of the boundary irregularity. Scattered waves penetrating through the boundary deep into the medium are considered under conditions of harmonic and pulsed nature of oscillations. Based on the application of the finite element method, a numerical simulation of scattered hydroacoustic responses and pulses of longitudinal and transverse waves refracted into the bottom layer was performed. The features of the radiation generated

by hydroacoustic sources near the interface are analyzed. The characteristic features of scattering are laid down as informative signs in the algorithm for diagnosing the parameters of the bottom soil.

Keywords: acoustic response, Kirchhoff scattering, sinusoidal-comb boundary, multi-lobed indicatrix, apodization along the wave front.

Введение

Рассеяние акустических волн на границе раздела сред с неровной границей представляет важную область, анализу которой посвящено значительное количество исследований, выполненных рядом отечественных и зарубежных авторов на протяжении многих предшествующих десятилетий и в ближайший обозримый период, что связано с востребованностью указанной темы на практике. Во многих случаях такой анализ обусловлен необходимостью углубленного исследования характеристик рассеяния акустических волн статистически неровной границей – взволнованной морской поверхностью, либо границей вода-донный грунт. В настоящей статье рассматривается частный случай рассеяния акустических волн, падающих на границу двух сред, имеющую синусоидально-периодическую гребенчатую форму. Граничащими могут быть две скалярные среды, отличающиеся по плотности, либо возможен контакт скалярной и твердой среды (при наличии в ней модуля сдвига – жесткости). На основе аналитического расчета и численного моделирования демонстрируется влияние рифления границы раздела на поле рассеяния при отражении и преломлении акустической волны, падающей из менее плотной среды (воздух, вода) в более плотную (донный грунт), либо наоборот. Подобный анализ был выполнен в работах [1, 2], но вследствие недостаточных вычислительных возможностей в предшествующие периоды не всегда удавалось в полной мере проиллюстрировать результаты расчетов. Вместе с тем, графические иллюстрации, представленные в работе, демонстрируют расширенные возможности удаленной диагностики физических параметров контактируемых сред и неровности границы, достижимые с помощью современных численных алгоритмов. Аналитически полученные результаты также подтверждены вычислительным пакетом, реализуемым методом конечных элементов [3 – 6]. Определенный к ним интерес может возникнуть ввиду открывающейся перспективы их потенциального применения в оперативной донной сейсмозаземке.

1. Постановка задачи в трехмерном пространстве

Плоская неограниченная по апертуре (недиафрагмированная) волна, бегущая в скалярной среде, падает сверху, отражается и проходит вниз, частично проникая сквозь границу. Верхняя область над границей характеризуется акустической скоростью c_1 , нижняя – c_2 , плотность среды ρ в упрощенной модели предполагается неизменной по величине. Распространение происходит под полярным θ и азимутальным углом φ , образуемыми вертикальным и горизонтальным ортами между нормалью к фронту. Зависимость амплитуды рассеянной волны от полярного и азимутального угла вычисляется (в приближении Борна) с учетом суммарного вклада в формирование рассеянного волнового отклика от всех отражающих участков границы на периоде возмущенной неровности. Для учета их суммарного вклада далее выполняется интегрирование по пространственному периоду неровности $x = l$.

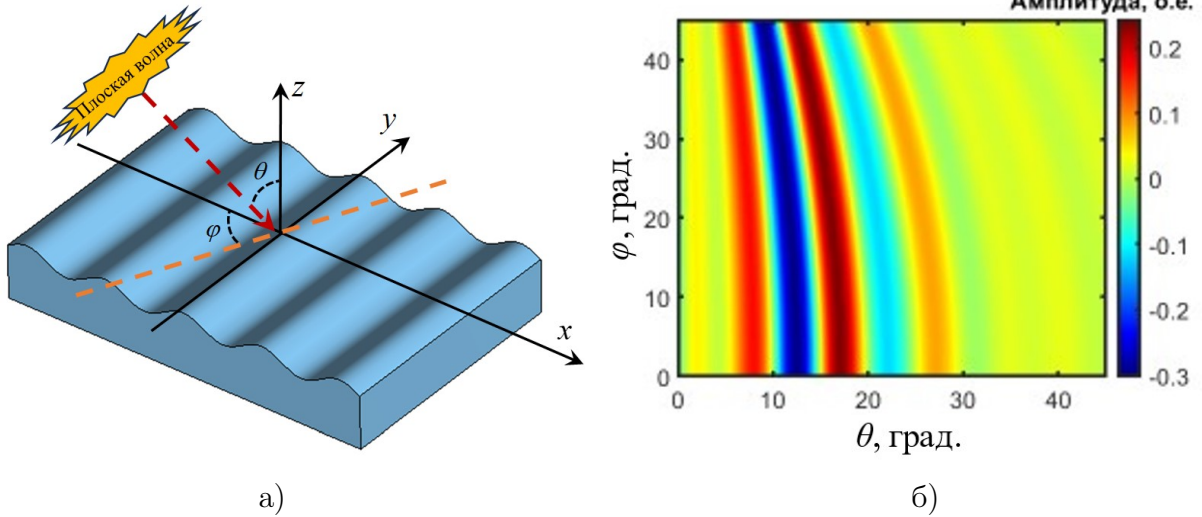


Рис. 1. а)Схематическое изображение падения плоской волны на синусоидальную границу раздела двух сред, б)Распределение поля рассеянной волны по полярному θ и азимутальному φ углам

На рис. 1 а) представлена иллюстрация гребенчатой структуры (трехмерное изображение) границы раздела сред. На рис. 1 б) графически демонстрируется сложный характер углового пространственного распределения поля рассеяния при произвольном выборе параметров: частота – отношение акустических скоростей в средах на границе. Тем самым иллюстрируются особенности при рассмотрении зависимости амплитуды поля рассеяния, как функции углов θ , φ .

2. Индикатрисы рассеяния наклонно падающей акустической волны

Обратимся к анализу зависимости амплитуды акустического поля (волна без ограничения по фронту – без диафрагмирования по апертуре) от полярного угла θ и ϑ – для преломленной волны (см. вставку на рис. 1 а). Используются следующие обозначения: $\delta = d/l \ll 1$, $d \ll \Lambda$ (d высота гребня, l – период гофрировки, Λ – длина акустической волны, причем в расчетах предполагается малость высоты гребня (ограничение первым приближением по δ и в пренебрежение слагаемыми с δ^2 и выше). Это исключает кратность отражений от склонов гребней, кроме того, оказывается возможным пренебречь квадратичными поправками при описании отклонения от осевых ортов нормали к гофрированной границе раздела. В области границы ставится условие «склейки» $u_x^{(1)}(y=0) = u_x^{(2)}(y=0)$, $u_y^{(1)}(y=0) = u_y^{(2)}(y=0)$ (скалярная среда), либо условие проскальзывания – недиагональный элемент тензора напряжений $\sigma_{xy}^{(2)}(y=0) = 0$ и непротекания $u_y^{(1)}(y=0) = u_y^{(2)}(y=0) = 0$ (например, в случае вода-твердая стенка). Справедливо следующее выражение, описывающее угловую зависимость амплитуды рассеянной отраженной волны в режиме гармонического излучения и при условии «склейки» на границе:

$$I(\theta) = \text{Re} e^{-i\Omega\eta \cos \theta} \times \int_0^1 \frac{\Sigma (\cos \theta - \delta \sin \theta \sin 2\pi\xi) - \sqrt{1 - \Sigma^2 \sin^2 \theta}}{\Sigma (\cos \theta - \delta \sin \theta \sin 2\pi\xi) + \sqrt{1 - \Sigma^2 \sin^2 \theta}} e^{i\Omega\xi \sin \theta + i\Omega\delta\xi \cos \theta \sin 2\pi\xi + i\Omega\delta\eta \sin \theta \sin 2\pi\xi} d\xi, \quad (1)$$

где $\xi = x/l$, $\eta = y/l$, $\Sigma = c_2/c_1$, $\Omega = \omega l/c_1$.

Аналогичная формула с учетом коэффициента прохождения записывается для акустической преломленной волны:

$$II(\theta) = Re e^{-i\Omega' \eta \cos \vartheta} \times \int_0^1 \frac{2\Sigma (\cos \theta - \delta \sin \theta \sin (2\pi\xi)) \cdot e^{i\Omega' \xi \sin \vartheta + i\Omega' \delta \xi \cos \vartheta \sin 2\pi\xi + i\Omega' \delta \eta \sin \vartheta \sin 2\pi\xi}}{\Sigma (\cos \theta - \delta \sin \theta \sin (2\pi\xi)) + \sqrt{1 - \Sigma^2 \sin^2 \theta}} d\xi. \quad (2)$$

Полученные зависимости описывают, как правило, лепестковую структуру, демонстрируемую графически. Съём данных об угловой направленности (лепестковой структуре) отраженных и прошедших рассеянных волн, максимальных по амплитуде, представляет важный информативный фактор диагностики сред с гребенчатой формой границы раздела, находящейся в контакте, который может быть доступен для регистрации приемными антеннами. В условиях гладкой границы раздела (или границ многих слоев) такой фактор как рассеяние Кирхгоффа отсутствует, что указывает на позитивную роль, которую могут играть эффекты рассеяния при диагностике характеристик среды. Поэтому значительный интерес представляет анализ влияния вариации параметров Σ , δ , l , Ω , на угловые характеристики рассеянного акустического поля. В качестве результата аналитического расчета представим пример индикатрисы, описывающей угловую характеристику рассеяния волны, распространяющейся вглубь среды после преломления на границе раздела. На рис. 2 а) изображен случай прохождения волны через границу при соотношении $c_2/c_1 = 1,1$, а на рис. 2 б) – при $c_2/c_1 = 0,2$. Из рисунков виден многолепестковый характер индикатрисы рассеяния.

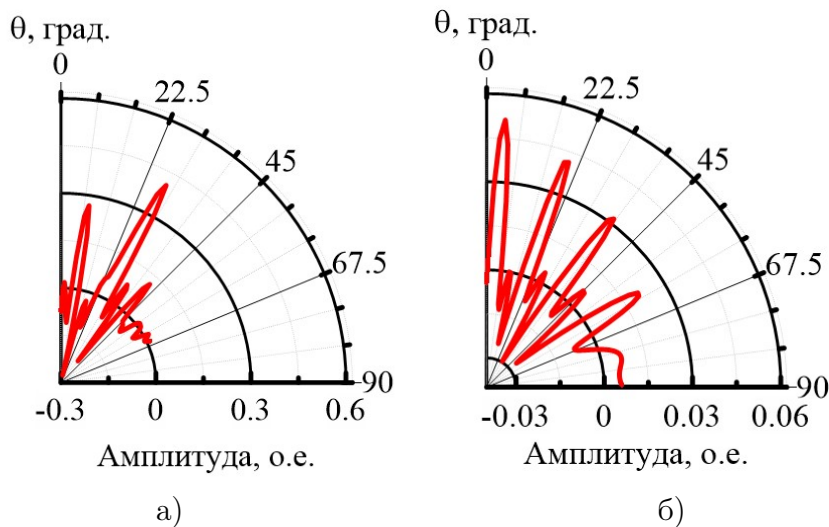


Рис. 2. Индикатриса рассеяния для преломленной волны при прохождении границы двух сред: а) из мягкой в более жесткую среду $c_2/c_1 = 1,1$, б) из более жесткой в мягкую $c_2/c_1 = 0,2$ (акустическая волна)

В антенных решетках с периодически эквидистантно расположенными приемниками ширина лепестков угловой характеристики обычно выражается соотношением, параметры которой подобны следующим: $\frac{2\pi l}{\Lambda} \simeq \frac{1}{\theta}$, $kl = \frac{1}{\theta} = \frac{\omega l}{c_1} \rightarrow \theta = \frac{c_1}{\omega l} = \frac{1}{\Omega} \approx \frac{1}{60}$. Однако графики на рис. 2 а), б) показывают, что угловой размер – ширина лепестка по θ превышает величину $1/60$. Отсюда следует, что его угловая ширина определяется как $\Delta\theta = c_1/\omega d$, вместо $\theta = c_1/\omega l$, что предполагается обычно или традиционно. Т.е. определяется высотой гребня d на неровности гофрированной границы, а не пространственным периодом неровности l .

3. Индикатриса рассеяния акустической волны на границе с усложненной формой периодической гофрировки

Представляет интерес рассмотреть особенности, свойственные угловой характеристике рассеяния волны, отраженной от границы раздела, имеющей неровность не синусоидальной формы, а в виде короткого, резко ограниченного по высоте и протяженности выброса и периодически повторяющегося вдоль X-координаты. При этом поверхность остается гладкой и ровной в остальной не искаженной части, не имеющий ей излома по Y. Указанный характер неровности вносит специфику в уже имеющийся набор представленных характеристик, соответствующих случаю синусоидальной формы гребчатой границы.

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} I' = & \cos(\Omega\eta \sin \theta) \int_0^1 \cos\left(\Omega\xi \cos \theta - \Omega\xi\delta \sin \theta e^{-(2\pi\xi)^2} - \Omega\eta\delta \cos \theta e^{-(2\pi\xi)^2}\right) d\xi - \\ & - \sin(\Omega\eta \sin \theta) \int_0^1 \sin\left(\Omega\xi \cos \theta - \Omega\xi\delta \sin \theta e^{-(2\pi\xi)^2} - \Omega\eta\delta \cos \theta e^{-(2\pi\xi)^2}\right) d\xi \end{aligned} \quad (3)$$

Этим обеспечивается возможность анализа влияния поперечного скачка скорости распространения в случае короткого по протяженности масштаба неровности (по сравнению с синусоидальной неровностью). На рис. 3 а), б), в) рассматривается несколько вариантов с различными соотношениями $\Sigma = c_2/c_1$.

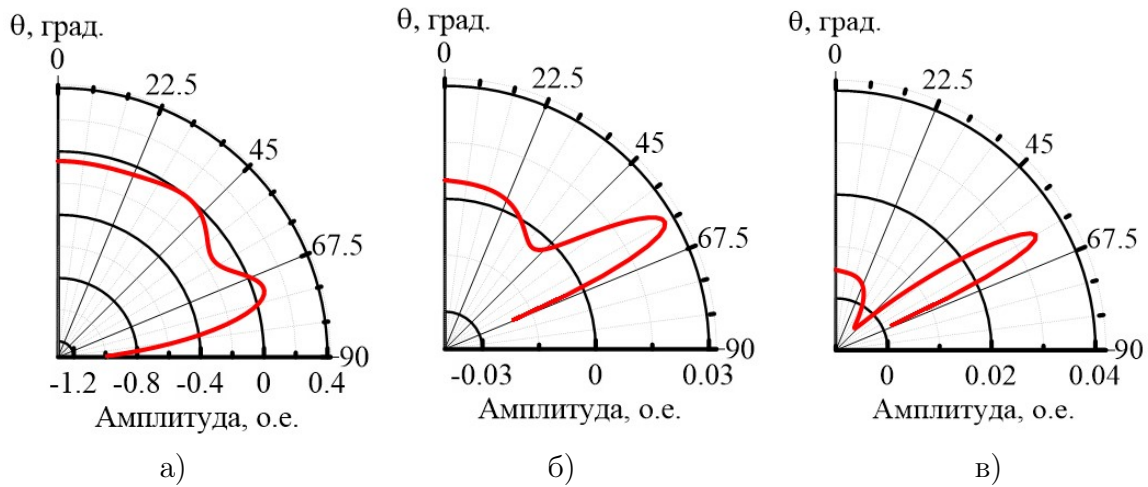


Рис. 3. Индикатриса рассеяния при различных значениях скачка скорости c_2/c_1 на границе, содержащей резкую вдоль X неровность:
а) $\Sigma = 0,35$, б) $\Sigma = 1,08$, в) $\Sigma = 1,09$

Демонстрируется перестройка индикатрисы рассеяния при смене скачка скорости распространения на границе контакта, причем характер перестроения является уже иным по сравнению с рассмотренными выше примерами синусоидальной неровности.

4. Индикатрисы рассеяния при проскальзывающем контакте на границе жидкость-твердое дно

При описании рассеяния в этом случае используются выражения для коэффициентов отражения-прохождения на границе с проскальзыванием: скалярная среда – жесткая, твердая среда, причем ввиду громоздкости строгих формул для описания этих коэффициентов рассматривается упрощенный случай, в котором справедливы

соотношения $c_1 = c_2 = \sqrt{3}c_{t2}$, $\rho_1 = \rho_2$ – т.е. условие равенства скорости продольной волны и скорости акустической волны в жидкости, а также идентичность параметра плотности в средах. Кроме того, донные породы подразумеваются классическими по соотношению констант упругости Лямэ, для которых ($\lambda = \mu$), или $c_{t2} = \sqrt{3}c_{l2}$. На рис. 4 а), б) демонстрируются индикатрисы рассеяния по продольной волне: рис. 4 а) – отраженная, рис. 4 б) – преломленная (расчетные формулы ввиду громоздкости не представлены).

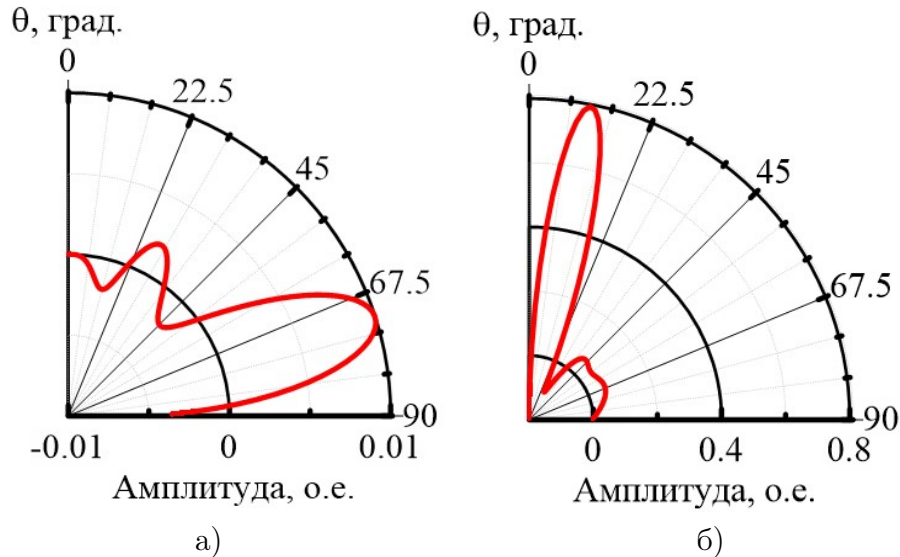


Рис. 4. Индикатриса рассеяния продольной волны:
а) отраженная волна, б) преломленная волна

В отличие от ранее рассмотренных теперь в индикатрисе характерно наличие единственного лепестка (с доминирующей амплитудой) вместо многолепестковой структуры. Легко видеть, что коэффициент отражения (падающих продольных волн) вплоть до углов 70° близок к 0. Коэффициент прохождения (по продольной волне) также представляет единственный лепесток в узком интервале углов, близких к нормали. Важно также отметить, что кроме объемных – падающей, отраженной и преломленной волн в волновом балансе принимают участие поверхностные квазиэлеевские волны и волны Стоунли.

5. Рассеяние импульсного сигнала

Обычно угловое распределение амплитуды рассеянной волны при гармоническом режиме излучения (зависимость от θ), используемое для диагностики параметров среды и границы раздела, сильно изменчиво и варьируется при смене частоты Ω и Σ , не позволяя фиксировать устойчивый признак получения требуемых характеристик. Один из путей преодоления возникающей сложности обеспечивается переходом к импульсному режиму при зондировании границы. Сечение рельефа, получаемого применительно к импульсному режиму, в отличие от гармонического, представляет собой интегральный показатель, стабильный – пригодный для интерпретации и диагностики параметра $\Sigma = c_2/c_1$.

Обратимся к рассмотрению отклика в импульсном режиме. Он образуется сначала интегрированием по частоте (с предварительным умножением на спектр гауссова импульса). Затем выполняется интегрирование по периоду неровности – суперпозиция волновых откликов всех элементарных отражателей на одном периоде гофрированной границы (синусоидальных гребней).

Представим выражение для отклика как функции текущего времени t и угла θ при конечной длительности воздействия $\bar{T} = \tau c_1/l$ – безразмерная величина. Для рассеянной преломленной волны справедлива запись:

$$III(\theta) = \int_0^1 \frac{2\Sigma (\cos\theta - \delta \sin\theta \sin(2\pi\xi)) e^{-\frac{(\xi \sin\theta - \eta \cos\theta + \xi \frac{\delta}{\Sigma} \sqrt{1 - \Sigma^2 \sin^2\theta} \sin(2\pi\xi) + \delta\eta \sin\theta \sin(2\pi\xi) - t)^2}{\bar{T}^2}}}{\Sigma (\cos\theta - \delta \sin\theta \sin(2\pi\xi)) + \sqrt{1 - \Sigma^2 \sin^2\theta}} d\xi \quad (4)$$

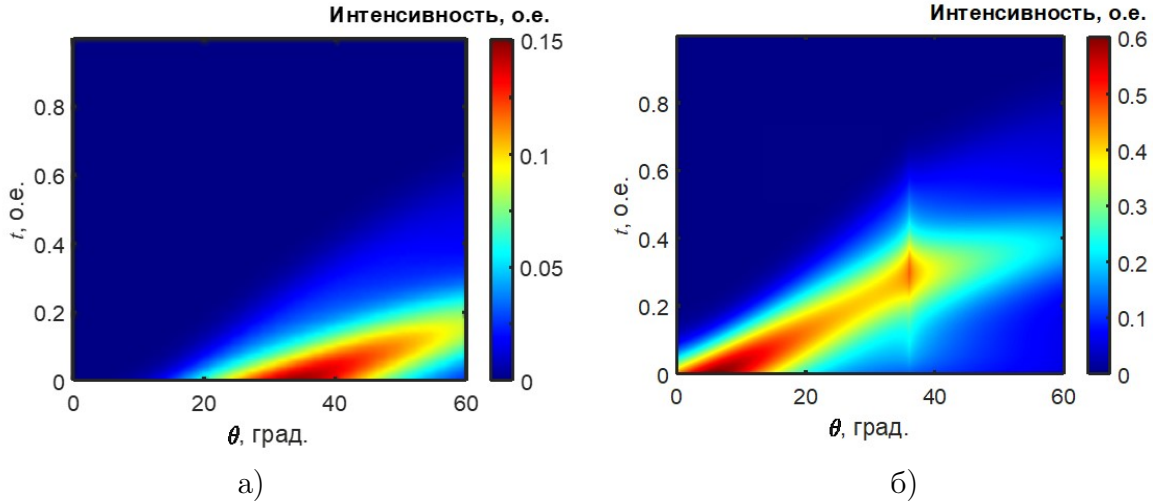


Рис. 5. Зависимость интенсивности импульсного отклика в преломленной волне от времени задержки и угла прихода θ для а) $c_2/c_1 = 0,35$, б) $c_2/c_1 = 1,7$

По результатам расчета по формуле (4) выполнены иллюстрации зависимости интенсивности импульсного акустического отклика, преломленного в водную среду, от времени задержки и угла прихода. Полученные зависимости представлены на рис. 5 а), б) в виде цветной номограммы на плоскости: угол прихода θ (градусы) – время задержки t (безразмерные относительные единицы). Характер зависимости на иллюстрациях значительно различен при $c_2/c_1 < 1$ и при $c_2/c_1 > 1$, что позволяет видеть по какую сторону границы скорость звука преобладает по величине.

6. Анализ акустического рассеяния методом конечных элементов

Рассмотрим пространственное распределение амплитуды гармонических акустических волн, рассеянных вверх, а также прошедших вниз в нижнюю среду, создаваемых монопольным и дипольным источником, установленными вблизи и выше границы раздела, имеющей гребенчатую синусоидальную форму. В этом случае имитируются волны ограниченной апертуры, падающие на границу под различными углами. В этом разделе обсуждаются результаты, полученные с использованием численной реализации метода конечных элементов (вычислительный пакет COMSOL). Здесь развиваются и углубляются подходы, реализация которых возможна уже современными вычислительными средствами [7 – 12]. В данной работе расчетная область дискретизировалась достаточно большим количеством элементов тетраэдрального типа. Для обеспечения приемлемой точности вычислений выбиралось ~ 20 узлов на длину волны. Соответственно, в трехмерной постановке задачи требовалось $\sim 1,5$ ТБ оперативной памяти, и время расчета одного варианта на 56-ядерном вычислительном модуле составляло около суток.

При рассеянии волн в поле отраженной, либо преломленной волны, создаваемых источниками, близко расположенными у границы раздела, имеющей рифленую поверхность контакта, возникают области с повышенной засветкой вдоль узких угловых секторов, которые повторяют ход лучей, соответствующих экстремальным интенсивностям в выше рассмотренных и проанализированных индикатрисах рассеяния акустических волн. Иллюстрации амплитудного пространственного распределения представлены на рис. 6 а), б) для источника – монополя в случаях рассеяния ровной границей и рифленой границей.

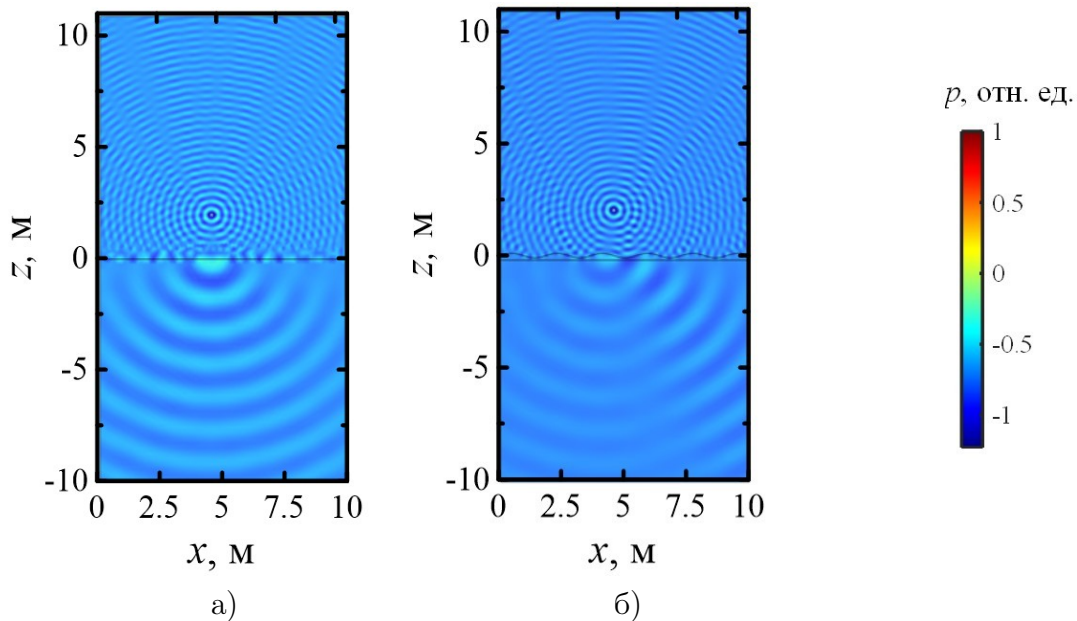


Рис. 6. Акустическое поле (1 кГц) монопольного источника вблизи горизонтальной границы раздела: а) монополь вблизи ровной границы (воздух-вода), б) монополь вблизи гребенчатой границы

Для иллюстрации выбраны среды со скоростью звука в верхней среде (воздух) $c_1 = 340$ м/с, а в нижней (вода) $c_2 = 1500$ м/с, при этом поддерживается гармонический режим колебаний акустического поля $f = 1$ кГц. В обоих случаях демонстрируется волновое поле монополя, причем удаление от границы его центра составляет 5λ (длин волн в воздухе). Первым (рис. 6 а)) представлено поле преломленной волны для ровной границы раздела, а на следующем (рис. 6 б)) – для случая гребенчатой границы, когда глубина гофрировки (высота гребня) составляет $\delta = d/l = 0,1$. При таком позиционировании центра источника, смещенном по X на $l/4$ направо, имеет место нулевое смещение высоты рифленой поверхности, но при максимуме ее наклона. Благодаря этому (в поле преломленной волны) возникает определенное отклонение (некоторый угол наклона к горизонту) от вертикали узкого сектора с повышенным уровнем «засветки» в водном полупространстве.

На рис. 7 а), б), в) представлены три случая (с перестройкой по позиции центра) пространственного распределения поля при излучении осциллирующим дипольным моментом с наклонной ориентацией оси (под углом 30° к вертикали, с расположением диполя в плоскости XZ) и установленным в воздушной среде на дистанции 5λ от границы воздух-вода $h = 5\lambda = 5c/f$. На рис. 7 а) (верхняя часть) в воздухе присутствует несколько наклонных лучей отраженной волны. В нижней части демонстрируется поле преломленной волны в воде. Центр диполя здесь приходится на координату X , соответствующую минимуму высоты границы раздела гребенчатого рифления.

Направленность в максимуме излучения по преломленной волне строго вертикальная. На рис. 7 б) (внизу) демонстрируется отклонение направления максимума характеристики рассеяния при сдвинутой влево позиции центра диполя, когда смещение составляет $l/4$. Происходит поворот максимума характеристики против часовой стрелки на угол порядка $\sim \pi/6$. Аналогичное перестроение направленности, показано на рис. 7 в) (внизу), которое соответствует смещению направо центра диполя по X на $-l/4$. Имеет место поворот характеристики направо (по часовой стрелке). Тем самым показано, что при сдвигах центра диполя по X на $\pm l/4$ достигается сканирование на угол порядка $\sim \pm \pi/6$.

Заметим, что представленные на рис. 7 а), б), в) реализации пространственного распределения при наличии на границе гребенчатой структуры соответствуют рассеянной акустической волне с длиной, равной $\Lambda \approx l$, соответствующей более высокой частоте относительно значения $\Lambda = 2l$, отвечающего случаю брэгговского резонансного рассеяния.

Таким образом, в случае границы воздух-вода демонстрируется отклонение от нормали углового сектора с максимальной «засветкой», т.е. сканирование по углу поля рассеяния преломленных волн.

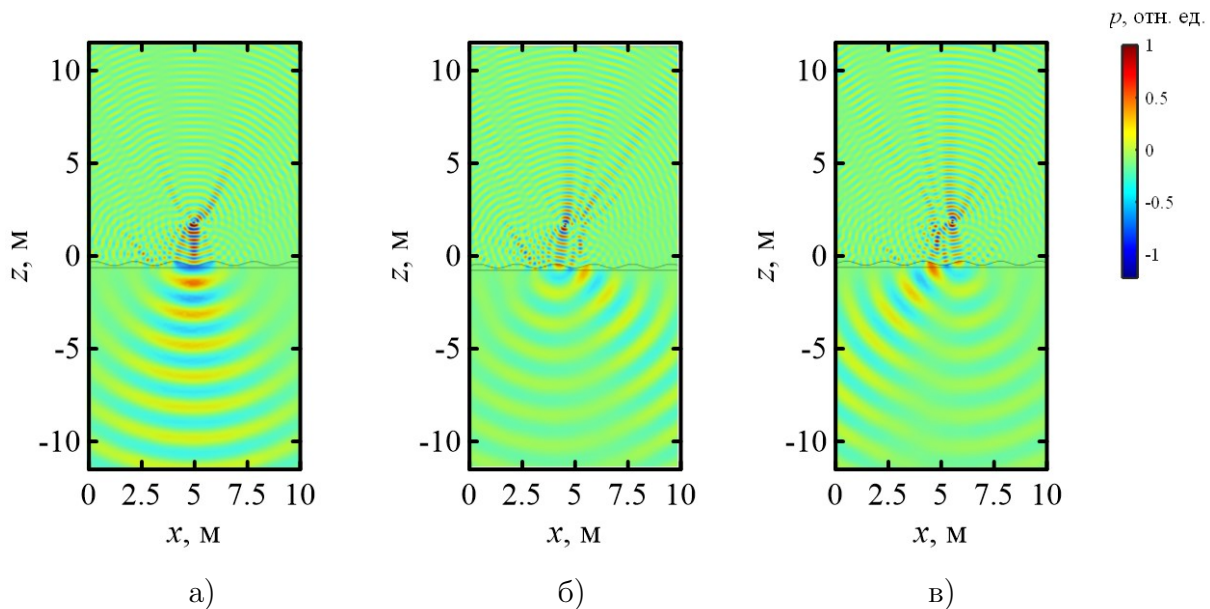


Рис. 7. Смена позиционирования центра диполя вблизи границы. Сканирование характеристики рассеяния диполя: а) размещение центра над точкой минимума рифления, б) смещение на $l/4$ слева от минимума, в) смещение на $l/4$ справа от минимума ($f = 1$ кГц)

В заключение рассмотрим особенности акустического поля, излучаемого обоими типами источников: монополю и дипольным моментом в случае их осцилляций у границы раздела двух сред вода – нейлон (твердая среда). Для дипольного момента предполагается тот же угол наклона оси к нормали. Источники расположены в воде на удалении $h = 5\lambda = 5c/f$ ($f = 1$ кГц) от рифленой границы нейлон. Глубина гофрировки составляет $\delta = d/l = 0,1$. Имеет место условие равенства скорости распространения: звука в воде и продольных (P) волн в твердой среде – в нейлоне. На рис. 8 а), б), в), г) демонстрируется пространственное амплитудное волновое распределение в поле рассеяния двух типов источников – монополя (рис. 8 а), в)) и диполя (рис. 8 б), г)). Как и на предыдущем рис. 7, поле отраженной волны изображено в области выше границы, поле преломленной волны – в области ниже границы. На первых двух – рис. 8 а), б) рассмотрена ровная плоская граница раздела,

на двух других – рис.8 в), г) имеет место случай, в котором представлены волны, рассеянные на синусоидальной гребенчатой границе сред.

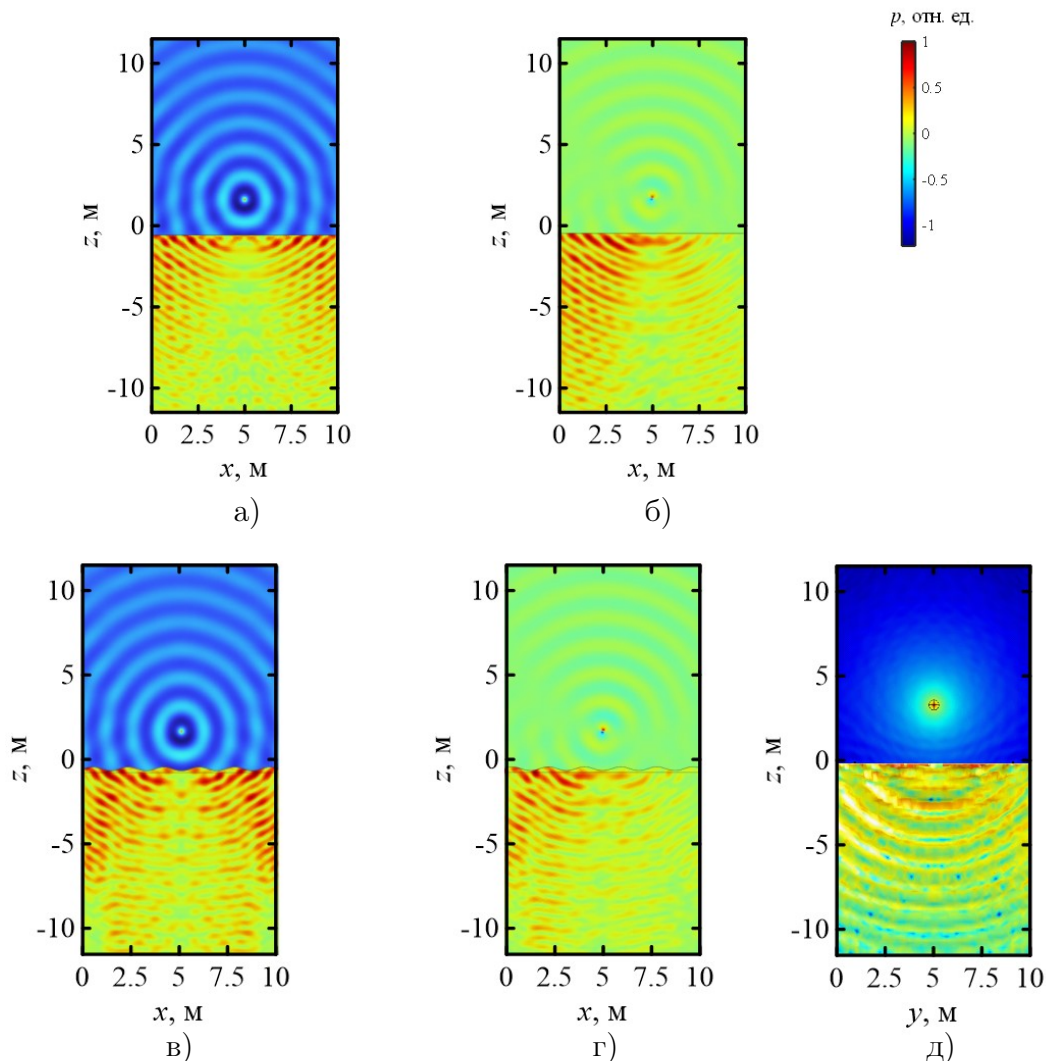


Рис. 8. а)–г) Пространственное распределение (разрез XZ в плоскости) акустического поля монополя и дипольного источников, действующих в области границы вода-нейлон, д) Пространственное распределение акустического поля монополя в плоскости YZ

Сравнение характера падающих волн на рис.8 а), б) (верхняя часть рисунка – звук в воде) и преломленных волн (нижняя часть – в нейлоне) показывает, что уже при условии ровной плоской границы и в случае обоих видов источников в прошедшей волне результатом является суперпозиция продольной (P) и поперечной (SV) волн с преобладанием последней. Скорость распространения поперечных (SV) волн, доминирующих в преломленной волне, в 2 раза ниже скорости (P) волн, что следует из уменьшенной (вдвое) периодичности максимумов и минимумов, соответствующих аналогичным у звуковой волны в воде. Вследствие наклонной оси дипольного источника наблюдается увеличение амплитуда в одном из секторов преломленной волны, излученной вглубь твердой среды. Имеет место усложнение характера волновой картины.

Из рис. 8 в), г) видно, что наиболее интенсивная часть поля рассеянных преломленных волн в случае перехода к гребенчатой неровности на границе для обоих типов источника смещается в область нормали, т.е. в центральную область, лежащую на перпендикуляре к границе. Таким образом, основная особенность связана

с возбуждением в твердом теле поперечных волн, доминирующих в поле преломленных волн, возникающих независимо от обоих типов источника, порождающего звуковое поле в воде. При этом через границу как плоскую, так и с гребенчатой неровностью проникают продольные волны, преобразуясь в области контакта вода-нейлон преимущественно в поперечный волновой тип. Пространственное амплитудное распределение акустического поля, излучаемого осциллирующим монополем в воде вблизи рифленой границы раздела вода-нейлон в плоскости YZ , показано на рис. 8 д). Моделирование продемонстрировано для гофрированной структуры размером по координате Y равной длине.

Заключение

В работе изложены результаты аналитического расчета (по Кирхгоффу) и численного моделирования рассеяния звука, возникающего на границе двух сред с периодически рифленой (синусоидальной, гребенчатой) формой поверхности контакта и резко различающихся по звуковой скорости. Аналитически построены индикатрисы рассеяния отраженных и преломленных волн при различных условиях и параметрах скачка на границе раздела сред. На основе численного моделирования продемонстрирована возможность сканирования индикатрисы рассеяния, являющейся угловой характеристикой направленности излучения акустических источников, осциллирующих монополя и диполя, действующих вблизи границы раздела сред. Установлены особенности характеристик рассеянных акустических волн на гребенчатой границе, которые могут найти практическое применение при оценке параметров донных осадков, при разработке алгоритмов зондирования, в геофизических устройствах и приборах морской сейсмозаведки.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № FFUF-2024-0041).

Список литературы

1. Серебряный, А. Н. Генерация подводного шума сулоем внутренней волны большой амплитуды в океане / А.Н. Серебряный, А.В. Фурдуев, А.А. Аредов, Н.Н. Охрименко. // Акустический журнал. – 2022. – Т. 68, № 3. – С. 312 – 322.
2. Басс, Ф. Г. Рассеяние звука статистически неровной поверхностью / Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. – М.: Наука, 1972. – 424с. – ISBN 5458285794, 9785458285797
3. Аббакумов, К.Е. Рассеяние плоских упругих волн на микрошероховатой границе раздела твердых сред / К.Е. Абакумов // Дефектоскопия. –2017. – №.7. – С. 3 – 17.
4. Шагапов, В.Ш. Особенности отражения и преломления акустических волн на границе раздела между газом и дисперсной системой / В.Ш. Шагапов, В.В. Сарапулова. // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, №.5. – С. 119 – 129.
5. Разин, А.В. Рассеяние поверхностной акустической волны на неоднородности малых размеров в твердом полупространстве / А.В. Разин. // Известия вузов. Радиофизика. – 2010. – Т.53, №.7. – С. 464 – 480.
6. Прохоров, И.В. Математическое моделирование процессов распространения акустических и электромагнитных полей в случайно-неоднородных средах / И.В. Прохоров, Н.С. Суровенко, И.Б. Агафонов. // Технические проблемы освоения мирового океана (ИПМТ ДВО РАН). – 2009. – Т. 3. – С. 244 – 248.
7. Иванов, А.Н. Математическое моделирование процессов распространения акустических волн в структурно-неоднородных средах: диссертация кандидата физико-

математических наук (01.04.06) / А. Н. Иванов. – Владивосток: Тихоокеан. океанол. институт ДВО РАН, 2008. – 141с.

8. Шашурин, А.Е. Методика оценки акустического поля от автотранспортного потока / А.Е. Шашурин, В.А. Васильев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 8. – С. 601 – 611 .

9. Иванов, Н.И. Использование метода преобразования звуковых полей для расчёта эффективности шумозащитных конструкций / Н.И. Иванов, Н.В. Тюрина, А.Е. Шашурин, П.С. Курченко // Noise Theory and Practice. – 2020. – № 6(4). – С. 128 – 134.

10. Захаров, А.В. Законы сохранения механики в задачах распространения волн через границы инерционно-упругих сред / А.В. Захаров, И.П. Салтыков // Noise Theory and Practice. – 2024. – № 10(3). – С. 27 – 41.

11. Вагин, А.В. Волновые процессы в средах с цилиндрическими поверхностями при условии нежесткого контакта / А.В. Вагин, А.С. Воротынцева // Noise Theory and Practice. – 2024. – № 10(3). – С. 11 – 26.

12. Darmon, M. Acoustic Scattering Models from Rough Surfaces: A Brief Review and Recent Advances. / M. Darmon, V. Dorval, F. Baqué // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10. – P. 8305.

References

1. Serebryany, A. N. Generation of underwater noise by a large-amplitude internal wave in the ocean / A. N. Serebryany, A. V. Furduyev, A. A. Aredov, N. N. Okhrimenko. // Acoustic journal. - 2022. - Vol. 68, No. 3. - P. 312 - 322.

2. Bass, F. G. Sound scattering by a statistically uneven surface / F. G. Bass, I. M. Fuks. - М.: Nauka, 1972. - 424 p. - ISBN 5458285794, 9785458285797

3. Abbakumov, K. E. Scattering of plane elastic waves at a micro-rough interface between solid media / K. E. Abakumov // Defectoscopy. - 2017. - No. 7. - P. 3 - 17.

4. Shagapov, V. Sh. Features of reflection and refraction of acoustic waves at the interface between a gas and a dispersed system / V. Sh. Shagapov, V. V. Sarapulova. // Applied Mechanics and Technical Physics. – 2015. – Vol. 56, No. 5. – P. 119 – 129.

5. Razin, A.V. Scattering of a surface acoustic wave by small-sized inhomogeneities in a solid half-space / A.V. Razin. // News of universities. Radiophysics. – 2010. – Vol. 53, No. 7. – P. 464 – 480.

6. Prokhorov, I.V. Mathematical modeling of the processes of propagation of acoustic and electromagnetic fields in randomly inhomogeneous media / I.V. Prokhorov, N.S. Surovenko, I.B. Agafonov. // Technical problems of development of the world ocean (IPMT FEB RAS). – 2009. – Vol. 3. – P. 244 – 248.

7. Ivanov, A.N. Mathematical modeling of acoustic wave propagation processes in structurally inhomogeneous media: dissertation of candidate of physical and mathematical sciences (01.04.06) / A. N. Ivanov. - Vladivostok: Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. - 141 p.

8. Shashurin, A.E. Methodology for assessing the acoustic field from a traffic flow / A.E. Shashurin, V.A. Vasiliev // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. - 2023. - No. 8. - P. 601 - 611 .

9. Ivanov, N.I. Using the method of transforming sound fields to calculate the effectiveness of noise protection structures / N.I. Ivanov, N.V. Tyurina, A.E. Shashurin, P.S. Kurchenko // Noise Theory and Practice. – 2020. – No. 6(4). – P. 128 – 134.

10. Zakharov, A.V. Conservation laws of mechanics in problems of wave propagation

through the boundaries of inertial-elastic media / A.V. Zakharov, I.P. Saltykov // Noise Theory and Practice. – 2024. – No. 10(3). – P. 27 – 41.

11. Vagin, A.V. Wave processes in media with cylindrical surfaces under non-rigid contact / A.V. Vagin, A.S. Vorotyntseva // Noise Theory and Practice. – 2024. – No. 10(3). – P. 11 – 26.

12. Darmon, M. Acoustic Scattering Models from Rough Surfaces: A Brief Review and Recent Advances. / M. Darmon, V. Dorval, F. Baqué // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10. – P. 8305.