

Характеристики донного грунта, существенные для задач акустического профилирования

А. В. Вагин[✉], Я. А. Пелагеев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ av.vagin@bk.ru

Аннотация. Исследуется связь между характеристиками донного грунта, влияющими на решение задач его профилирования. Рассмотрены физические свойства донных осадков, определена зависимость между скоростью распространения волн и пористостью материала слоистой структуры. Представлена математическая модель оценки коэффициентов отражения и прохождения для продольной и поперечных волн в модели слоистой структуры. Определено влияние поперечной волны на сдвиговый волновой процесс при зондировании донного грунта. Выполнен расчет коэффициентов отражения для модели слоистой структуры и построена графическая зависимость коэффициентов отражения от угла падения продольной волны.

Ключевые слова: профилирование, донный грунт, физические характеристики, отражение

Для цитирования: Вагин А. В., Пелагеев Я. А. Характеристики донного грунта, существенные для задач акустического профилирования // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 4. С. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-5-15.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Characteristics of the Bottom Soil Essential for the Tasks of Acoustic Profiling

A. V. Vagin[✉], Ya. A. Pelageev

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ av.vagin@bk.ru

Abstract. The paper studies the relationship between the characteristics of the bottom soil that affect the solution of the problem of bottom soil profiling. The physical properties of bottom sediments are considered, the relationship between the wave propagation velocity and the porosity of the layered structure material is determined. A mathematical model is presented for estimating the reflection and transmission coefficients for longitudinal and transverse waves in the layered structure model. The influence of a transverse wave on the shear wave process during bottom soil probing is determined. The reflection coefficients for the layered structure model are calculated and a graphical dependence of the reflection coefficients on the incidence angle of a longitudinal wave is constructed.

Keywords: profiling, bottom soil, physical characteristics, reflection

For citation: Vagin A. V., Pelageev Ya. A. Characteristics of the Bottom Soil Essential for the Tasks of Acoustic Profiling // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 4. P. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-5-15.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. При зондировании морского дна акустическим способом происходит частичное отражение акустических лучей от поверхности дна и их частичное проникновение вглубь осадочного материала. При слоистости дна, которая присуща практически всей осадочной толще дна океана, звуковые сигналы отражаются от границ отдельных слоев и также регистрируются при эхолотном промере, давая информацию о внутренней структуре подводного грунта.

Такие низкочастотные импульсные системы, работающие по принципу эхолота, получили название профилографов донного грунта, а их использование для изучения стратификации донных отложений фигурирует в литературе под названиями сейсмопрофилирование, акустическое профилирование [1].

С использованием акустического профилографа донного грунта решаются задачи стратификации слоев донного грунта с последующей классификацией их типов при выполнении инженерно-геологических, геофизических, гидрографических изысканий в составе комплекса работ по исследованию дна Мирового океана.

Безальтернативное применение акустического профилографа при проведении грунтовой съемки в практических задачах инженерно-геологических, геофизических и гидрографических работ обусловлено, во-первых, широким спектром информативных возможностей при исследовании строения и вещественного состава донного грунта морского дна, во-вторых, возможностью построения трехмерного донного профиля, в-третьих, возможностью обнаружения в осадочной толще донного грунта объектов техногенного происхождения.

Грунтовая съемка – составная часть морских гидрографических работ, выполняемая с целью получения информации о распределении грунтов дна до скального основания. Объектом исследования

при такой съемке служит слой донного грунта, который необходимо стратифицировать.

Стратификация донного грунта с помощью акустического профилирования заключается в определении существующего различия в акустических импедансах каждого слоя грунта, что обусловлено условиями осадконакопления и, следовательно, зависит от типа донного грунта с определенными физико-акустическими характеристиками (табл. 1).

При профилировании дна определяют время распространения эхосигнала от антенны до границ раздела сред. Далее амплитуду эхосигналов во временных интервалах между выделенными границами раздела сред используют для выполнения классификации путем количественного анализа.

Количественный анализ эхосигналов заключается в оценке амплитуд сигналов, отраженных от границы раздела «вода–дно» и поддонных слоев, а также в сравнении с коэффициентами отражения известных эталонных зависимостей с последующим восстановлением нарастающего импеданса.

Так, например, в [1] в целях экологического мониторинга прибрежных акваторий и повышения точности определения слоистой структуры дна рассматривается задача классификации материалов донного грунта по коэффициенту затухания акустических сигналов. Измеряя амплитудный и спектральный коэффициенты отражения от границы раздела или сравнивая фазы излученного и принятого сигналов, можно определить такие параметры, как акустический импеданс и скорость звука в конкретном осадочном материале с дальнейшей комплексной стратификацией дна. При этом, вследствие значительного затухания звука в толще донного грунта и воздействия помех, перечисленные методы могут обладать низкой точностью. Чтобы решить эту проблему, для излучения в грунт используются широкополосные акустические сигналы, ослабление которых

Табл. 1. Физико-акустические характеристики донных грунтов
Tab. 1. Physical and acoustic characteristics of bottom soils

Тип донного грунта	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Затухание волн, дБ/м · кГц
Ил газонасыщенный	1250	950	0.85
Ил жидкий	1475	1150	0.04
Ил глинистый	1455	1450	0.06
Ил с алевритом и песком	1445	1650	0.25
Песок мелкозернистый	1600	2000	0.30
Песок крупнозернистый	1515	2100	0.70
Глины	1600	2100	0.61
Скальный грунт	3600	2500	0.40

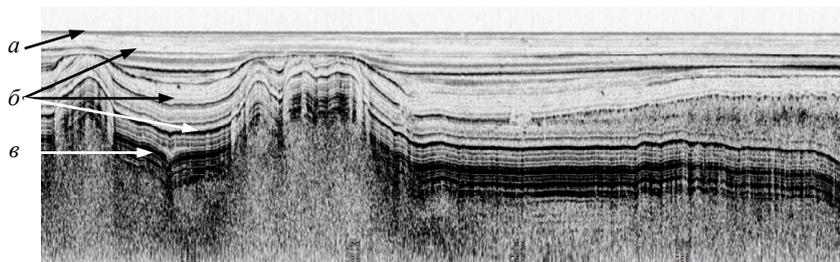


Рис. 1. Фрагмент гидролокационного изображения структуры донного грунта:

a – граница раздела «вода–дно»; *б* – слои осадков; *в* – скальное основание

Fig. 1. A fragment of a sonar image of the structure of the bottom soil:

a – the water–bottom interface, *б* – the sediment layers; *в* – rock base

будет неравномерным на разных частотных составляющих. Затем, восстановив закон затухания, можно определить коэффициент затухания звука в донных отложениях. Далее, зная коэффициент затухания и скорость звука в грунте, становится возможным продолжить классификацию исследуемого слоя донных осадков.

Гидролокационное изображение, формируемое в процессе профилирования дна, представлено на рис. 1.

Гидролокационное изображение (профилограмма) на рис. 1 формируется в координатах «пройденный путь–глубина» и соответствует разрезу донного грунта по пути движения носителя.

На рис. 1 однозначным образом определяются граница раздела «вода–дно», слои осадков и скальное основание. Степень насыщенности черного цвета на профилограмме соответствует уровню амплитуды отраженного эхо-сигнала, или, по терминологии геологов – уровню «мощности» слоя.

Амплитуда отраженных эхосигналов определяется коэффициентом межслойного отражения и пропорциональна изменению импеданса вещества слоя.

В связи с этим существенное влияние на количественную оценку акустических волн при профилировании донного грунта оказывают физические свойства и геологическая структура донных грунтов, после взаимодействия с которыми акустические сигналы отражаются и несут в себе информацию об особенностях распределения структуры донной поверхности и внутреннего состава дна, представляющую особый интерес для классификации типов донного грунта с отнесением к одному из литологических классов.

Таким образом, данные об отражении звука от дна могут быть использованы для дистанционного определения физических свойств донных грунтов. В предположении, например, что дно

представляет собой жидкую однородную полубесконечную среду с ровной плоской границей, коэффициент отражения от него при заданном угле падения определяется плотностью грунта, скоростью распространения и затуханием в нем продольных волн. С учетом взаимодействия связей между этими величинами, присущих естественным осадкам, можно по значению коэффициента отражения оценить указанные величины, а от них перейти к более общим физическим характеристикам грунта.

Частотная зависимость коэффициента отражения при этом может указывать на правильность сделанных предположений, а угловая позволяет независимо оценить скорость звука в грунте и его поглощение. Скорость звука оценивается по значению угла полного внутреннего отражения или угла полного прохождения, а поглощение – по характеру зависимости в области больших углов падения.

Цель данной статьи состоит в определении связи между характеристиками донного грунта, влияющими на решение задачи стратификации донного грунта.

Физические свойства донных осадков.

Преобладающая часть площади дна Мирового океана покрыта слоем сравнительно рыхлых донных отложений. Основная их масса сконцентрирована непосредственно у материков, а наибольшие градиенты осадочной толщи наблюдаются в области материкового склона. По степени уплотнения различают рыхлые, полууплотненные и уплотненные донные осадки. В табл. 2 представлено их более подробное описание [2]–[6].

Самая верхняя часть толщи донных осадков представляет собой неконсолидированную массу с текучей консистенцией и высокой влажностью, обладающую объемной и сдвиговой упругостью, что предполагает распространение в осадке как продольных, так и поперечных волн. В акустическом отношении донный осадок характеризуется плот-

Табл. 2. Разделение донных осадков по типу уплотнения
Tab. 2. Separation of bottom sediments by type of compaction

Категория осадков	Вид осадка	Локализация
Рыхлые	Ил, глубоководная глина, илистый песок, глинистый песок, водонасыщенный песок	Практически повсеместно
Полууплотненные	Литифицированный (не размокающий в воде, камнеподобный) ил, мягко-пластичная глина, песчаная глина, рыхлый известняк, известковая глина, вулканические пеплы	В основном на шельфе и материковом склоне
Уплотненные	Сцементированный известняк, кремний, каменный обломочный материал	

ностью ρ , скоростями распространения и затухания продольных волн c_l и β_l соответственно, а также скоростями распространения и затухания поперечных (сдвиговых) волн c_t и β_t . Также особый интерес представляют его гранулометрический состав и пористость. В табл. 3 представлена условная градация донных осадков по размеру частиц [3].

Табл. 3. Разделение донных осадков по размеру частиц
Tab. 3. Separation of bottom sediments by particle size

Вид осадка	Средний размер частиц, мм
Суспензии	Менее 0.001
Глина	0.001...0.010
Алевриты	0.01...0.10
Песок	0.1...1.0
Галька и обломочный материал	Более 1.0

Экспериментально выявлена линейность связи плотности рыхлого осадка с его пористостью, причем эта зависимость практически не связана ни с литологическим, ни с минеральным составом осадочной толщи, районом океана и т. д. При этом скорость продольной волны c_l также связана с пористостью осадка, а значит, и с его плотностью. Эмпирическая формула для определения плотности осадка выглядит следующим образом [6]:

$$\rho = \rho_c - (\rho_c - \rho_v)k,$$

где ρ_c – плотность минеральных компонент (скелет грунта); ρ_v – плотность воды; k – пористость в относительных единицах.

Скорость распространения звука в осадке определяется по эмпирической формуле

$$c = 2367 - 22.9k + 0.15k^2,$$

где c – скорость звука, м/с; k – пористость, %.

Зная плотности ρ_c и ρ_v , сжимаемость материала частиц осадка u_c и сжимаемость осадка в целом u (сумма сжимаемостей воды и твердого минерала с весовыми множителями), скорость распространения продольных волн в определенном

слое осадка может быть найдена по эмпирической формуле [2]

$$c_l = [u_c \rho_c - k(u_c \rho_c - u \rho)]^{1/2}.$$

На рис. 2 представлена взаимосвязь пористости и скорости звука в естественных осадках [4].

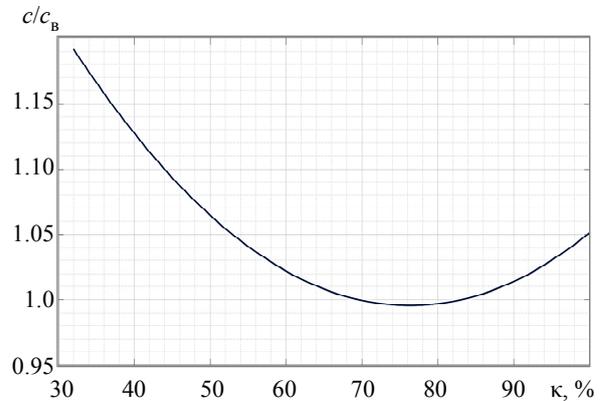


Рис. 2. Экспериментальная зависимость относительной скорости звука от пористости
Fig. 2. Experimental dependence of the relative velocity of sound on porosity

По причине релаксационных потерь в жидкости, а также трения воды о твердые частицы и твердых частиц друг о друга продольные волны в донных осадках имеют свойство поглощаться. Коэффициент поглощения и β_l при этом обладает частотной зависимостью в соответствии с формулой

$$\beta_l = \alpha_l f,$$

где α_l – коэффициент, зависящий от свойств грунта (табл. 4); f – частота звука, кГц.

Табл. 4. Эмпирические зависимости коэффициента поглощения от пористости в донном осадке
Tab. 4. Empirical dependences of the absorption coefficient on porosity in the bottom sediment

$k, \%$	α_l
< 42.7	$0.2747 + 0.00527k$
От 42.7 до 52.0	$0.04903k - 1.7688$
От 52 до 65	$3.3232 - 0.0489 \cdot k$
От 65 до 90	$0.7602 - 0.01487k + 0.000078k^2$

Известна теоретическая зависимость между скоростями продольных c_l и поперечных c_t волн в упругом теле [5], [6]:

$$c_t = c_l [1 - 1/2(1 - \sigma_{II})]^{1/2}, \quad (1)$$

где σ_{II} – коэффициент Пуассона, изменяющийся в пределах от 0 до 0.5 (для жидкости $\sigma_{II} = 0.5$). Из приведенного выражения следует, что скорость поперечных волн всегда меньше скорости продольных, причем отношение c_t/c_l монотонно возрастает от 0 до 0.71.

При падении плоской волны из жидкости на ровную плоскую границу раздела жидкости и тела, обладающего сдвиговой упругостью, отношение вертикальных компонент потоков энергии в сдвиговой E_t и продольной E_l волнах определяется выражением

$$E_t/E_l = c_t^3 F(\theta) / c_l c_1^2,$$

где θ – угол падения на границу раздела; c_1 – скорость звука в воде;

$$F(\theta) = \frac{4 \sin \theta [1 - (c_l/c_1) \sin^2 \theta]}{[1 - 2(c_l/c_1)^2 (c_l/c_1)^2 \sin^2 \theta]^2}.$$

При $c_l \approx c_1$ для произвольного угла θ можно получить

$$E_t/E_l = (c_t/c_l)^3,$$

т. е. с уменьшением скорости продольных волн c_l энергия поперечных волн в осадках резко умень-

шается по сравнению с энергией продольных волн. Однако следует отметить, что при нормальном падении $\theta = 0$ сдвиговые волны не возбуждаются, а в случае $\theta = \arcsin(c_B/\sqrt{2}c_t)$ не возбуждаются продольные.

Из экспериментальных данных [2] о поглощении сдвиговых волн следует, что логарифмический декремент затухания Δ_t связан с коэффициентом поглощения β_t соотношением $\Delta_t = \beta_t c_t / f$.

Как и в случае с продольными волнами, $\beta_t \sim f$, следовательно, декремент затухания сдвиговых волн не зависит от частоты. При этом коэффициент поглощения поперечных волн β_t в несколько раз, а иногда и на порядок превосходит коэффициент поглощения продольных волн β_l [7].

Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о практически универсальной связи основных физических характеристик естественных донных отложений, среди которых: пористость, плотность, средний размер частиц, скорости продольных и поперечных волн, а также коэффициенты их поглощения. Зная одну из характеристик, ориентировочно можно определить другие. Пример совокупности взаимосвязей между физическими факторами представлен в табл. 5.

Характеристики слоя грунта подвержены изменчивости в зависимости от глубины, при этом различают регулярные и случайные неоднородности. К первым относят слоистость грунта и градиенты характеристик осадочного материала, а ко вторым – случайные объемные неоднородности.

Табл. 5. Физические характеристики верхнего слоя осадочного материала в различных районах Атлантического океана

Tab. 5. Physical characteristics of the upper layer of sedimentary material in various areas Atlantic Ocean

Характеристика осадка	Тип района		
	Прибрежные шельфовые окраины	Расчлененный и холмистый рельеф	Абиссальные равнины и глубоководные котловины
Плотность ρ , кг/м ³	1.7...2.2	1.4...1.7	1.2...1.4
Пористость κ , %	29...60	60...71	77...89
Средний размер частиц, мм	0.004...0.250	0.001...0.04	0.0005...0.001
Относительная скорость продольных волн c_l/c_B	1.20...1.28	0.96...1.02	0.96...0.98
Поглощение продольных волн α_p , дБ / (м · кГц)	0.35...0.75	0.08...0.35	0.05...0.08
Скорость поперечных волн c_p , м/с	90...250	80...110	30...80
Поглощение поперечных волн α_p , дБ/(м · кГц)	1.05...2.25	0.80...1.05	0.5...0.8

Табл. 6. Обобщенные данные о генеральных градиентах скорости звука в осадках
Tab. 6. Generalized data on general gradients of sound velocity in precipitation

Тип осадка	Зависимости скорости звука c (км/с) от заглубления в осадок h (км)	Градиент до 1 км, c^{-1}
Турбидитный	$c = 1.511 + 1.304h - 0.741h^2 + 0.257h^3$	1.3...0.8
Кремниевый	$c = 1.509 + 0.869h - 0.267h^2$	0.9...0.6
Известковый	$c = 1.559 + 1.713h - 0.374h^2$	1.9...1.3

Практически любому району Мирового океана присуща слоистость осадочной толщи (относительно резкие границы раздела, определяющие стратификацию осадка). Современные средства профилирования донного грунта способны проводить стратификацию донных осадков в нескольких масштабах в зависимости от выбранного диапазона рабочих частот, при этом общая закономерность заключается в том, что с увеличением разрешающей способности уменьшается глубина проникновения акустического сигнала от поверхности дна.

В общем случае в зависимости от заглубления в толщу осадка его физические характеристики могут изменяться хаотически как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Между тем известны генеральные градиенты изменчивости параметров [8]. Так, при значительном заглублении в осадок плотность и скорость звука в нем имеют тенденцию к росту, а пористость – к падению. Обобщенные данные о генеральных градиентах волн в осадках приведены в табл. 6.

Следует подчеркнуть, что в мелководных песчаных и алевритовых осадках вблизи границы «вода–грунт» возможно существование очень резкого градиента, кардинальным образом определяющего отражающие свойства дна. Это явление обусловлено разрывом сред, скачком градиента их параметров в совокупности.

С заглублением в толщу осадка имеет свойство изменяться и коэффициент поглощения продольных волн – по мере заглубления в грунт α_l уменьшается, приближаясь к некоторому насыщению. Градиент скорости сдвиговых волн уменьшается с увеличением заглубления и на глубинах около 100 м становится равным градиенту скорости продольных волн. В табл. 7 представлены градиенты скорости сдвиговых волн при заглублении в толщу осадка h .

Табл. 7. Регрессионные уравнения для скорости сдвиговых волн при заглублении в грунт
Tab. 7. Regression equations for the velocity of shear waves when sinking into the ground

Диапазон заглубления, м	c_p , м/с	
	Песок	Глинистый алеврит
0...36	$90 + 128h^{0.28}$	$116 + 4.65h$
36...120	–	$237 + 1.28h$
120...650	–	$322 + 0.58h$

Объемные случайные неоднородности осадочного материала, о которых было сказано ранее, до настоящего времени практически не изучены, однако предполагается, что, располагаясь в горизонтальной плоскости дна, они оказывают влияние на свойства отраженных акустических сигналов и могут вносить хаотический элемент в проводимые измерения [6].

Математическая модель оценки коэффициента отражения от слоистой структуры донного грунта. В общем случае при интерпретации отражающих свойств дна используется простейшая теоретическая модель, при которой дно океана рассматривается как ровная плоская граница двух однородных идеальных жидких сред с некоторыми модификациями. При этом для полного и правомерного подхода к описанию отражения звука необходимо стремиться к учету всей сложности строения реального донного грунта. Чтобы показать, какие принципиально новые свойства отражения вводятся в рассмотрение в реальных условиях, решим задачу нахождения неизвестных направлений, амплитуд и поляризаций (ориентаций вектора упругого смещения относительно границы раздела сред или системы координат) отраженных и прошедших волн по упрощенной модели падения акустической волны из воды в слой грунта (рис. 3).

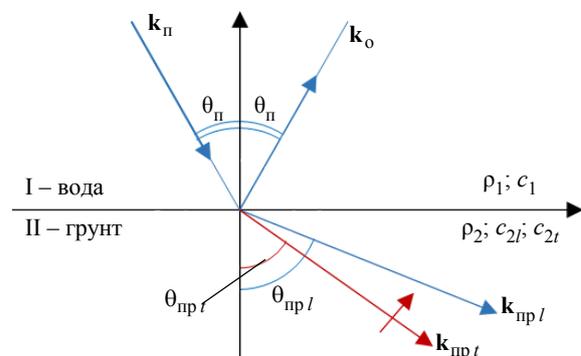


Рис. 3. Задача падения акустической волны из воды в слой
Fig. 3. The problem of the acoustic wave falling from the water into the layer

На рис. 3 ρ_1, c_1 – плотность воды и скорость звука в воде соответственно; ρ_2 – плотность грунта; c_{2l} – скорость продольной волны в грунте; c_{2t} – скорость поперечной волны в грунте. Индексы «п», «о», «пр» обозначают принадлежность параметров к конкретной волне – падающая, отраженная, преломленная соответственно.

Для плоской границы раздела двух сред коэффициент отражения определяется по известной общей формуле

$$R_0 = \frac{Z_{\text{вх}} - Z}{Z_{\text{вх}} + Z},$$

где $Z_{\text{вх}} = \rho_2 c_{2l} / \cos \theta_{\text{пр}}$ – входной импеданс отражающей среды (грунта); $Z = \rho_1 c_1 / \cos \theta_{\text{п}}$ – импеданс среды, из которой падает звуковая волна (вода); c_2 – любая из волн в грунте.

Пользуясь законом Снеллиуса, можно получить выражение для модуля коэффициента отражения в следующем виде:

$$R_0 = \left(m \cos \theta_{\text{п}} - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{\text{п}}} \right) / \left(m \cos \theta_{\text{п}} + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{\text{п}}} \right),$$

где $m = \rho_2 / \rho_1$; $n = c_1 / c_2$ – показатель преломления.

Данная формула получена для плоских волн, при этом с введением некоторых ограничений, определяемых геометрией расположения излучателя и приемника, она может быть справедлива и для волн сферических.

Направление распространения волны задается волновым вектором \mathbf{k} и его углом к нормали к границе раздела θ . Переход к более сложной модели дна выполним с рассмотрения падения волны на неидеальную (поглощающую) среду, для которой справедливы комплексные волновое число излучения $k = a + ib$, скорость звука и показатель преломления, причем величины a и b вещественны и положительны, а приведенное ранее выражение для модуля коэффициента отражения R_0 остается справедливым, при этом данная величина становится зависимой от отношения b/a – тангенса угла потерь. Ее анализ в реальном морском грунте, приведенный в [6], показал, что при расчете коэффициента отражения R_0 величиной b/a можно пренебречь, за исключением области больших углов падения, когда с приближением к углу полного внутреннего отражения коэффици-

ент R_0 при условии $n < 1$ резко возрастает, причем градиент возрастания тем больше, чем меньше тангенс угла потерь.

В более усложненной модели дна вместе с распространением продольных волн рассматривается также распространение поперечных (сдвиговых) волн, что опять-таки отражено на рис. 3. Для оценки их влияния на отражение звука при реальных физических свойствах грунта обратимся к частному решению волнового уравнения в прямоугольной системе координат:

$$\Phi(x, y, z, t) = A e^{j(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)},$$

где A – амплитуда; $\mathbf{k} = ik_x + jk_y + k_z$, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – орты вдоль координатных осей.

В [9] задача отражения и преломления плоской волны, падающей из жидкости на границу раздела «жидкость–твердая среда» (рис. 3), решается введением коэффициентов отражения, прохождения и трансформации по скалярному потенциалу упругого смещения Φ :

$$R_{ll}^{\Phi} = \frac{A_o}{A_{\text{п}}}, T_{ll}^{\Phi} = \frac{A_{\text{пр}}}{A_{\text{п}}}, T_{lt}^{\Phi} = \frac{A_{\text{пр}t}}{A_{\text{п}}},$$

где R_{ll}^{Φ} – коэффициент отражения продольной волны; T_{ll}^{Φ} – коэффициент прохождения продольной волны; T_{lt}^{Φ} – коэффициент трансформации при прохождении падающей продольной волны в преломленную поперечную волну; первый из нижних индексов в обозначениях коэффициентов указывает на тип падающей волны, а второй – на тип отраженной или преломленной (трансформированной) волны.

После математических преобразований приходим к детерминированным выражениям коэффициентов:

$$\begin{cases} R_{ll}^{\Phi} = \frac{Z_l \cos^2 2\theta_{\text{пр}t} + Z_t \sin^2 2\theta_{\text{пр}t} - Z}{Z_l \cos^2 2\theta_{\text{пр}t} + Z_t \sin^2 2\theta_{\text{пр}t} + Z}; \\ T_{ll}^{\Phi} = \frac{2Z_l \cos 2\theta_{\text{пр}t}}{Z_l \cos^2 2\theta_{\text{пр}t} + Z_t \sin^2 2\theta_{\text{пр}t} + Z} \frac{\rho_1}{\rho_2}; \\ T_{lt}^{\Phi} = \frac{-2Z_t \sin 2\theta_{\text{пр}t}}{Z_l \cos^2 2\theta_{\text{пр}t} + Z_t \sin^2 2\theta_{\text{пр}t} + Z} \frac{\rho_1}{\rho_2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $Z = \frac{\rho_1 c_1}{\cos \theta_{\text{п}}}$; $Z_l = \frac{\rho_2 c_{2l}}{\cos \theta_{\text{пр}l}}$; $Z_t = \frac{\rho_2 c_{2t}}{\cos \theta_{\text{пр}t}}$.

Выражения (2) следует дополнить законом Снеллиуса в виде

$$\frac{\sin \theta_{\Pi}}{c_1} = \frac{\sin \theta_0}{c_1} = \frac{\sin \theta_{\text{пр}l}}{c_{2l}} = \frac{\sin \theta_{\text{пр}t}}{c_{2t}},$$

который при заданном θ_{Π} позволяет определить неизвестные углы θ_0 , $\theta_{\text{пр}l}$ и $\theta_{\text{пр}t}$.

Тогда анализ расчетной зависимости коэффициента отражения звука от угла падения показал, что для реальных рыхлых морских осадков влияние сдвиговой упругости пренебрежимо мало, как и вклад поперечных волн в общий поток сдвиговой энергии, поэтому при построении акустической модели дна их можно считать жидкой средой.

Входной импеданс слоистой структуры можно определить по формуле [4]

$$Z_{1\text{вх}} = [Z_{2\text{вх}} - iZ_1 \operatorname{tg}(k_{1z}d_1)]Z_1/[Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg}(k_{1z}d_1)], \quad (3)$$

где $Z_{2\text{вх}}$ – входной импеданс нижней границы слоя толщиной d_1 ; k_{1z} – вертикальная компонента волнового числа в слое.

Если слой лежит на однородном жидком полупространстве, то $Z_{2\text{вх}} = Z_{\text{пп}}$, где $Z_{\text{пп}}$ – импеданс полупространства; если же это полупространство также имеет слоистую структуру, то $Z_{1\text{вх}}$ можно определить по (3), осуществляя круговую замену индексов.

При отношении толщины слоя к длине волны, меньшем или равном единице, суммарный коэффициент отражения мало отличается от коэффициента отражения, определяемого полупространством. По мере увеличения частоты или толщины слоя это различие возрастает и приобретает осциллирующий характер, особенно в области больших углов падения, что обусловлено интерференцией волн, отраженных от верхних и нижних границ слоя. При отношении толщины слоя к длине волны, большем или равном единице, видна зависимость, близкая к наблюдаемой при отражении от полупространства с параметрами слоя, что объясняется зависимостью глубины проникновения в грунт от частоты и угла падения.

При этом на достаточно высоких частотах влияние нижней границы из-за поглощения звука становится несущественным, и коэффициент отражения определяется акустическими параметрами верхнего слоя грунта. С ростом частоты при фиксированной толщине слоя частота осцилля-

ций коэффициента отражения увеличивается настолько, что изменение угла на $1-2^\circ$ уже ведет к изменению коэффициента отражения от максимума к минимуму.

В условиях натурального эксперимента при толщине слоев порядка единиц метров и на частотах порядка единиц килогерц и выше частота осцилляций может быть весьма осложнена возможным влиянием нескольких слоев грунта. Увеличение числа слоев ведет к усложнению угловой зависимости коэффициента отражения, что приводит к необходимости проведения вычислений на ЭВМ.

В [10]–[12] авторами для поиска модели, заменяющей собственными свойствами неоднородности естественного происхождения в системе твердых слоев с целью дальнейшего рассмотрения влияния неоднородностей на звукоотражающие свойства системы, предлагается введение предположения об изменении условий жесткого (сварного) контакта на границах раздела слоев и переходе к граничным условиям в приближении «линейного скольжения», которые допускают частичную передачу упругих смещений при полной передаче упругих напряжений. При этом разрывы в передаче упругих смещений возникают из-за наличия выступов и/или впадин микрорельефа на границе твердого слоя и полупространства, а также взаимодействия между ними. Построение количественной модели выступов и/или впадин микрорельефа становится возможным на основе введения величины шероховатости и коэффициента перфорации ξ в нормальный KGN, а в тангенциальный KGT – коэффициентов жесткости, определяющих передачу нормальных составляющих упругих смещений и касательных составляющих соответственно:

$$\begin{aligned} \text{KGN} &= \frac{(\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + 2\mu_2)c_{l1}c_{l2}}{(\lambda_1 + 2\mu_1)c_{l1} + (\lambda_2 + 2\mu_2)c_{l2}} \frac{2\pi\xi}{\omega d^2(1-\xi)}, \\ \text{KGT} &= \frac{\mu_1\mu_2c_{t1}c_{t2}}{\mu_1c_{t1} + \mu_2c_{t2}} \frac{2\pi\xi}{\omega d^2(1-\xi)}, \end{aligned}$$

где λ_1 , μ_1 – коэффициенты Лямэ в слое; λ_2 , μ_2 – коэффициенты Лямэ в полупространстве; c_{l1} и c_{l2} – скорости продольных волн в граничных средах; c_{t1} и c_{t2} – скорости поперечных волн в граничных средах; $\omega = 2\pi f$, f – частота акустической волны, проходящей из слоя в полупространство; $\xi = b^2/d^2$ – коэффициент перфорации, b – размер участка с отсутствием контакта, d – среднее расстояние между контактными участками.

Введем соотношение, определяющее коэффициент отражения при падении продольной волны из слоя на полупространство, учитывающий влияние KGN:

$$R_0 = \frac{A \cos(\theta_{\text{пл}}) + B \sin(\theta_{\text{пл}})}{C \cos(\theta_{\text{пл}}) + D \sin(\theta_{\text{пл}})}, \quad (4)$$

где

$$A = \left(2 \frac{i\omega z_1^2}{\text{KGN}} \right);$$

$$B = -i \left(\frac{z_1^2}{z_2} - z_2 - \frac{i\omega z_1 z_2}{\text{KGN}} + \frac{i\omega z_1 z_2}{\text{KGN}} - \frac{\omega^2 z_1^2 z_2}{\text{KGN}^2} \right);$$

$$C = -2 \left(z_1 - \frac{i\omega z_1^2}{\text{KGN}} \right);$$

$$D = -i \left(\frac{z_1^2}{z_2} + z_2 - \frac{i\omega z_1 z_2}{\text{KGN}} - \frac{i\omega z_1 z_2}{\text{KGN}} - \frac{\omega^2 z_1^2 z_2}{\text{KGN}^2} \right);$$

z_1 и z_2 – импедансы слоя, из которого падает акустическая волна, и полупространства соответственно.

Консолидация вышеприведенных формульных выражений и особенностей распространения акустических волн в слоистых средах, существенных для задачи профилирования донного грунта, будет использована далее для расчета модели.

Расчет коэффициента отражения для модели «вода–песок–скальное основание». Для расчета зависимости коэффициента отражения для модели «вода–песок–скальное основание» от угла падения $\theta_{\text{пл}}$ в рассмотрение были взяты начальные параметры, приведенные в табл. 8.

Для учета некоторых не указанных в таблице параметров и значений использовались данные, приведенные в табл. 1, 5 и 7, а также формулы (1) и (2).

Границы раздела рассматриваемых сред приняты плоскими. Коэффициент отражения на границе сред «вода–песок» R_{012} при таком подходе задается формулой, приведенной в первой строке (2); на границе сред «песок–скальное основание» R_{023} – формулой (4), причем среда скального основания принимается за полупространство. Результаты расчетов приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

Из графической зависимости на рис. 4 видно, что на границе «вода–песок» при малых углах падения коэффициент отражения практически не зависит от угла падения, но вблизи некоторого угла, называемого углом полного внутреннего

Табл. 8. Начальные параметры для расчета модели «вода–песок–скальное основание»

Tab. 8. The initial parameters for the calculation of the «water–sand–rock base» model

Наименование параметра	Значение
Частота акустической волны f , Гц	2000
Угол падения $\theta_{\text{пл}}$, ... °	0...90
Скорость звука в воде c_1 , м/с	1500
Коэффициент затухания для крупнозернистого песка α_2 , Нп/м	0.04
Плотность воды ρ_1 , кг/м ³	997
Плотность крупнозернистого песка ρ_2 , кг/м ³	1515
Толщина слоя песка h , м	0.5
Коэффициент Пуассона для крупнозернистого песка ν_2	0.3
Коэффициент Пуассона для скального основания ν_3	0.27
Плотность скального основания ρ_3 , кг/м ³	3600
Коэффициент затухания для скального основания α_3 , Нп/м	0.023
Модуль Юнга для крупнозернистого песка E_2 , Па	$15.9 \cdot 10^6$
Модуль Юнга для скального основания E_3 , Па	$48.05 \cdot 10^9$
Размер участка с отсутствием контакта b , м	0.002
Среднее расстояние между контактными участками d , м	0.02

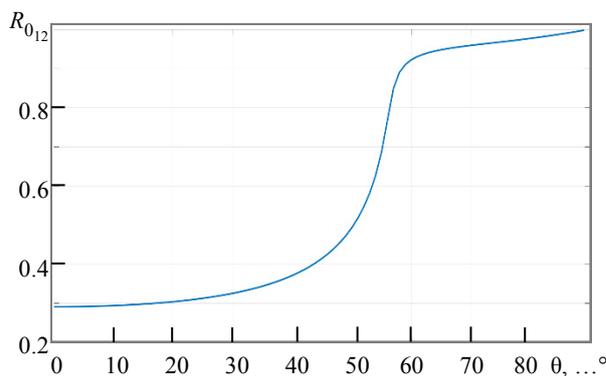


Рис. 4. Расчетная угловая зависимость коэффициента отражения звука на границе «вода–песок»

Fig. 4. Calculated angular dependence of the sound reflection coefficient at the water–sand boundary

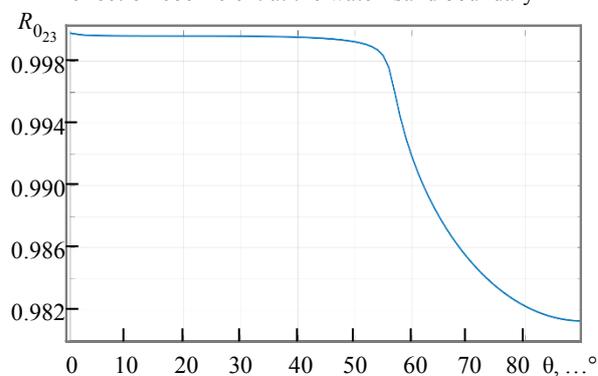


Рис. 5. Расчетная угловая зависимость коэффициента отражения звука на границе «песок–скальное основание»

Fig. 5. Calculated angular dependence of the sound reflection coefficient at the sand–rock base boundary

отражения, начинается резкое возрастание коэффициента отражения с увеличением угла и с быстрым стремлением его к единице в зависимости от поглощения звука в грунте.

Из графической зависимости на рис. 5 видно, что на границе «песок–скальное основание» при малых углах падения продольной волны коэффициент отражения практически не зависит от угла падения и близок к единице, но вблизи угла полного внутреннего отражения начинается его уменьшение к определенному значению.

Выводы.

1. Показано влияние на абсолютные значения скоростей продольных волн параметров слоистой донной структуры, взаимодействующих в при-

ближении «линейного скольжения» границ раздела слоев и других неоднородностей среды.

2. Для приближения «линейного скольжения» на границе между слоями определены неоднородные коэффициенты отражения. Решена задача об оценке коэффициентов отражения для модели слоистой структуры «вода–песок–скальное основание».

3. Полученные зависимости могут быть использованы применительно к задачам нахождения основных физико-акустических характеристик материала слоя донного грунта на основе акустических измерений, а также в качестве основного материала для проведения предызмерительных изысканий с целью получения максимального объема информации без применения гидроакустических средств.

Список литературы

1. Куценко А. Н., Слуцкий Д. С. К вопросу о классификации донных осадков в целях экологического мониторинга прибрежных акваторий // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2009. Т. 95, № 6. С. 96–103.

2. Луньков А. А., Григорьев В. А., Петников В. Г. Акустические характеристики морского дна и их влияние на дальнейшее распространение звука на арктическом шельфе // Успехи физ. наук. 2024. Т. 194, № 2. С. 184–207. doi: 10.3367/UFNr.2023.10.039600.

3. Флуктуации акустических сигналов при распространении звука в прибрежной акватории с большим уклоном дна / И. Б. Есипов, Г. В. Кенигсбергер, О. Е. Попов, В. Я. Поддубняк, В. И. Михеев // Школа-семинар им. акад. Л. М. Бреховских «Акустика океана». 2020. С. 55–59. doi: 10.29006/978-5-9901449-5-8-8.

4. Косарев Г. В. Анализ результатов профилирования мелководного прибрежного участка морского дна // Вестн. ДВГТУ. 2009. № 2(2). С. 127–131.

5. Гончаренко Б. И., Веденев А. И., Шуруп А. С. Особенности распространения звукового сигнала в мелком пресном водоеме при разной глубине погружения источника звука // ВМУ. 2019. Т. 3, № 5. С. 73–79.

6. Воловов В. И. Отражение звука от дна океана. М.: Наука, 1993. 272 с.

7. Оценка литологии донных отложений по спектрам широкополосных акустических сигналов / А. Э. Си-

ренко, Ю. В. Махнев, Ю. В. Яблокова, О. Л. Кузнецов // Вестн. Междунар. ун-та природы, общества и человека «Дубна». 2018. № 3(40). С. 36–41.

8. Лисютин В. А., Ластовенко О. Р. Оценка влияния внутреннего и вязкого трения на дисперсию и затухание звука в неконсолидированных морских осадках // Акуст. журн. 2020. Т. 66, № 4. С. 420–436. doi: 10.31857/S0320791920040061.

9. Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.

10. Вагин А. В. Распространение волн Лява в плоском слоистом полупространстве при нежестком контакте на границах // Дефектоскопия. 2022. № 11. С. 3–13. doi: 10.31857/S013030822211001X.

11. Vagin A. V., Abbakumov K. A., Vjuginova A. A. Sound propagation through structural elements in conditions of non-rigid contact at the boundaries between them // J. Akustika. 2021. Vol. 41. P. 155–162. doi: 10.36336/akustika202141155.

12. Аббакумов К. Е., Вагин А. В. Дисперсионное уравнение для продольной волны в слоистой среде с неоднородными граничными условиями при различных направлениях распространения // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 22–30. doi: 10.31857/S0130308220010030.

Информация об авторах

Вагин Антон Владимирович – ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: av.vagin@bk.ru

Пелагеев Ярослав Алексеевич – магистрант гр. 9583, кафедра электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: ypelageev@mail.ru

References

1. Kucenko A. N., Sluckij D. S. K voprosu o klassifikacii donnyh osadkov v celjah jekologicheskogo moni-

toringa pribrezhnyh akvatorij // Izv. JuFU. Tehn. nauki. 2009. T. 95, № 6. S. 96–103. (In Russ.).

2. Lun'kov A. A., Grigor'ev V. A., Petnikov V. G. Akusticheskie harakteristiki morskogo dna i ih vlijanie na dal'nee rasprostranenie zvuka na arkticheskom shel'fe // Uspehi fiz. nauk. 2024. T. 194, № 2. S. 184–207. doi: 10.3367/UFNr.2023.10.039600. (In Russ.).

3. Fluktuacii akusticheskikh signalov pri rasprostranении zvuka v pribrezhnoj akvatorii s bol'shim uklonom dna / I. B. Esipov, G. V. Kenigsberger, O. E. Popov, V. Ja. Poddubnjak, V. I. Miheev // Shkola-seminar im. akad. L. M. Brehovskih «Akustika okeana». 2020. S. 55–59. doi: 10.29006/978-5-9901449-5-8-8. (In Russ.).

4. Kosarev G. V. Analiz rezul'tatov profilirovanija melkovodnogo pribrezhnogo uchastka morskogo dna // Vestn. DVG TU. 2009. № 2(2). S. 127–131. (In Russ.).

5. Goncharenko B. I., Vedenev A. I., Shurup A. S. Osobennosti rasprostraneniya zvukovogo signala v melkom presnom vode pri raznoj glubine pogruzheniya istochnika zvuka // VMU. 2019. T. 3, № 5. S. 73–79. (In Russ.).

6. Volovov V. I. Otrazhenie zvuka ot dna okeana. M.: Nauka, 1993. 272 s. (In Russ.).

7. Ocenka litologii donnyh otlozhenij po spektram shirokopolosnykh akusticheskikh signalov / A. Je. Sirenko, Ju. V. Mahnev, Ju. V. Jabloкова, O. L. Kuznecov // Vestn.

Mezhdunar. un-ta prirody, obshhestva i cheloveka «Dubna». 2018. № 3(40). S. 36–41. (In Russ.).

8. Lisjutin V. A., Lastovenko O. R. Ocenka vlijanija vnutrennego i vjazkogo trenija na dispersiju i zatuhanie zvuka v nekonsolidirovannykh morskikh osadkah // Akust. zhurn. 2020. T. 66, № 4. S. 420–436. doi: 10.31857/S0320791920040061. (In Russ.).

9. Brehovskih L. M., Godin O. A. Akustika sloistyh sred. M.: Nauka, 1989. 416 s. (In Russ.).

10. Vagin A. V. Rasprostranenie voln Ljava v ploskom sloistom poluprostranstve pri nezhestkom kontakte na granicah // Defektoskopija. 2022. № 11. S. 3–13. doi: 10.31857/S013030822211001X. (In Russ.).

11. Vagin A. V., Abbakumov K. A., Vjuginova A. A. Sound propagation through structural elements in conditions of non-rigid contact at the boundaries between them // J. Akustika. 2021. Vol. 41. P. 155–162. doi: 10.36336/akustika202141155.

12. Abbakumov K. E., Vagin A. V. Dispersionnoe uravnenie dlja prodol'noj volny v sloistoj srede s neodnorodnymi granichnymi uslovijami pri razlichnykh napravlenijah rasprostraneniya // Defektoskopija. 2020. № 1. S. 22–30. doi: 10.31857/S0130308220010030. (In Russ.).

Information about the authors

Anton V. Vagin – Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: av.vagin@bk.ru

Yaroslav A. Pelageev – master's student of gr. 9583, Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: ypelageev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; принята к публикации после рецензирования 11.02.2025; опубликована онлайн 25.04.2024.

Submitted 14.11.2024; accepted 11.02.2025; published online 25.04.2024.