

Акустические поля в слоистой газонасыщенной среде

Б. И. Гончаренко, В. А. Гусев*

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра акустики. Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 08.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Исследованы особенности распространения акустических волн и ограниченных пучков в слоисто-неоднородной среде, содержащей газовые пузырьки. Такая система моделирует, в частности, акустические процессы в пресноводных водоемах с донным грунтом, содержащем газонасыщенные осадочные породы. Показано, что скорость звука в газонасыщенном грунте определяется количеством содержащегося в нем газа. При увеличении газа примерно до 1% от общего объема грунта скорость звука падает до 100 м/с, т.е. в 15 раз по сравнению со скоростью звука в воде. Рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения акустической волны от слоистой газонасыщенной среды и их зависимости от частоты и угла падения волны. Проведено сравнение с результатами экспериментальных исследований. Показано, что частотная зависимость модуля коэффициента отражения звука, полученная на одной из акваторий Клязьминского водохранилища, имеет осциллирующий характер, причем частота осцилляций зависит от толщины газонасыщенного слоя и не зависит от угла падения. Показана возможность восстановления параметров структуры слоистого грунта по этой частотной зависимости. Исследованы нелинейные акустические эффекты, связанные с сильной структурной нелинейностью жидкости с пузырьками. Рассмотрены различные случаи расположения излучателя по отношению к границе донного грунта и выведены эволюционные уравнения для случаев горизонтального и наклонного распространения интенсивной волны. Рассчитаны волновые профили и поперечная форма пучков.

PACS: 43.30.+m, 43.25.+y, 47.55.dd, 47.40.Nm.

УДК: 534.222

Ключевые слова: газонасыщенный слой, пузырьки газа, нелинейные пучки.

ВВЕДЕНИЕ

Донный грунт пресноводных водоемов, а также ряда шельфовых районов морей часто содержит газонасыщенные осадочные породы с некоторым количеством нерастворимых газов. Основным газом является метан, образующийся в результате микробиологических процессов и располагающийся в грунте в виде хаотически распределенных мелких пузырей. Ни истинное количество, ни распределение по размерам пузырьков обычно не известно. Наличие газовых пузырьков вызывает существенное снижение скорости звука, например, при 1% относительном объеме газа скорость звука в жидких осадках снижается до 100 м/с, т.е. в 15 раз по сравнению со скоростью в воде. Скорость звука определяется по формуле $c = (\rho\beta)^{-1/2}$, где ρ и β — средние значения плотности и сжимаемости жидкой среды. При наличии газовых пузырьков средняя плотность уменьшается незначительно, а сжимаемость увеличивается многократно, что и приводит к уменьшению скорости. Неравномерное пространственное распределение пузырьков, а также наличие газонасыщенных слоев приводит к перераспределению акустической энергии, ее локализации и концентрации вблизи этих слоев, способствует волноводному характеру распространения волн.

При анализе акустических полей в слоистой газона-

сыщенной среде нужно выделить несколько задач. Во-первых, исследование особенностей отражения и прохождения акустических волн через границы слоев газонасыщенных пород, расчет их угловых и частотных зависимостей. Интерес представляет развитие методов восстановления параметров такой среды, толщины слоев и концентрации газов. Во-вторых, описание поля направленных излучателей и ограниченных пучков в слоисто-неоднородной среде при различном расположении излучателя относительно слоя и условий эффективной генерации поля в газонасыщенном слое. Такой слой может стать концентратором акустического поля и способствовать дальнейшему распространению звука за счет уменьшения геометрической расходимости. В-третьих, исследование частотно-зависимых процессов в средах с пузырьками, их влияние на трансформацию волны и проявление нелинейных эффектов.

1. ОТРАЖЕНИЕ ОТ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО СЛОЯ

Ранее в работах [1, 2] было показано, что наличие пузырьков изменяет условия прохождения и отражения от границы осадочной породы. В частности, увеличивается интервал углов, под которым волны могут проникать в газонасыщенную среду, и уменьшается интервал углов, под которым волны могут выйти из нее. Однако последовательного вывода коэффициентов отражения и прохождения именно от ограниченного слоя проведено не было. Рассмотрим особенности поведения угловой и частотной зависимости модуля коэффици-

*E-mail: vgusev@bk.ru

ента отражения для пресноводных водоемов (прудов, водохранилищ) с газонасыщенном грунтом. Если водный слой ограничен снизу однородным жидким полупространством, то угловая зависимость коэффициента отражения является гладкой функцией и полностью определяет влияние нижней границы на звуковое поле в воде [3]. Если нижнее полупространство неоднородно, например, имеет слоистую структуру, то можно ожидать, что зависимости модуля и фазы коэффициента отражения от угла падения будут иметь осциллирующий характер при толщине верхнего слоя больше половины длины волны. Величина этих осцилляций будет зависеть от затухания звука в верхнем слое грунта, а также от его толщины и волнового сопротивления. В некоторых случаях угловые характеристики для двухслойного грунта будут иметь вид, аналогичный характеристике для однородного полупространства.

При получении теоретических оценок будем использовать данные, полученные при проведении натурных работ на гидроакустическом полигоне, расположенном на акватории Клязьминского водохранилища. Для проведения работ были выбраны районы с постоянной глубиной места примерно равной $H = 8.5$ м. Протяженность участка составляла не менее 2–2.5 км, ширина 800–1000 м. Близлежащий пологий берег был расположен примерно в 250 м от места проведения эксперимента. Учитывая приведенные параметры выбранного участка, можно с достаточной точностью считать его безграничным в горизонтальном направлении. По ранее проводившимся оценкам на этом участке можно считать, что скорость звука в грунте существенно меньше скорости звука в воде. При этом пробы грунта, взятые на одном из участков водохранилища, показали наличие приповерхностного слоя толщиной примерно 0.6–0.8 м, со средней плотностью равной 1.6 г/см^3 и с большим содержанием газа [4].

Рассмотрим в качестве примера угловые и частотные характеристики модуля коэффициента отражения от дна пресноводного водохранилища глубиной 8.5 м с илистым грунтом, измеренные нами методом стоячих волн. Особенность этого метода сводится в расположении ненаправленного излучателя под поверхностью воды на глубине $H \leq \lambda/4$, где λ — длина звуковой волны на верхней частоте исследуемого диапазона частот. По данным вертикальных разрезов звукового давления были определены значения модуля коэффициента отражения $|V|$ в зависимости от угла падения звуковой волны θ и частоты f при разных углах падения звуковой волны. Полученные в результате этих расчетов угловые характеристики модуля коэффициента отражения приведены на рис. 1, где точки соответствуют частоте 500 Гц, крестики — 550 Гц и кружки — 700 Гц. Анализ данных рис. 1 не позволяет выделить какие-либо осцилляции угловой зависимости модуля коэффициента отражения. На рис. 2, б приведена частотная характеристика модуля коэффициента отражения, соответствующая тем же условиям проведения эксперимента. Точки на графике соот-

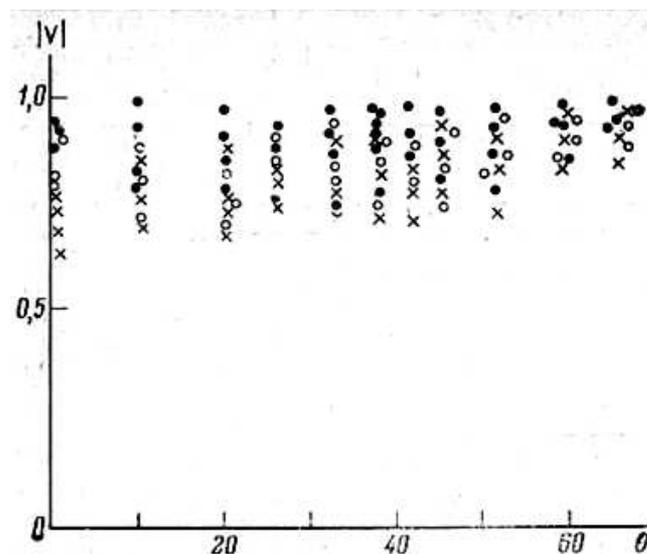


Рис. 1: Значения модуля коэффициента отражения в зависимости от угла падения звуковой волны

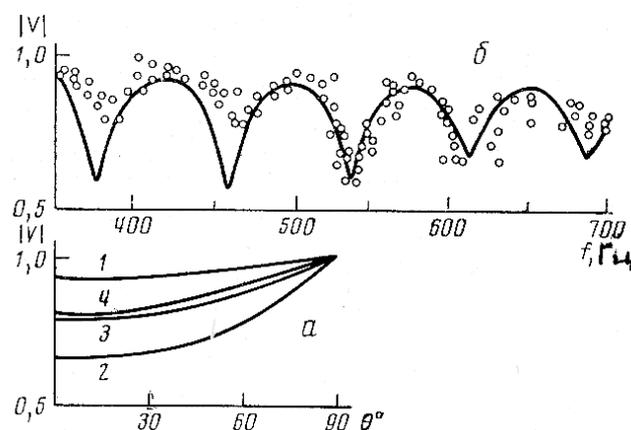


Рис. 2: Угловые (а) и частотные (б) характеристики модуля коэффициента отражения звука для двухслойной модели грунта ($c_2 \ll c_0$): 1 — 500 Гц, 2 — 550 Гц, 3 — 600 Гц и для однородного полупространства: 4 — 500 Гц.

ветствуют экспериментальным значениям. Отчетливо просматривается осциллирующая частотная характеристика с периодом равным ≈ 80 Гц. Положение минимумов на частотной характеристике практически не изменялось при изменении угла падения. Такое поведение частотных характеристик возможно только в том случае, если скорость в газонасыщенном слое существенно меньше скорости звука в воде. Частотные характеристики модуля коэффициента отражения позволяют с помощью несложных вычислений определить параметры верхнего слоя грунта, а также параметры нижнего полупространства. Используя экспериментальную частотную зависимость модуля коэффициента отражения, были определены параметры двухслойной моде-

ли грунта. Плотность промежуточного газонасыщенного слоя $\rho_1 \approx 1,6 \text{ г/см}^3$, толщина этого слоя грунта и скорость звука в нем соответственно $h \approx 0,6 \text{ м}$, $c_1^I \approx 100 \text{ м/с}$. Параметры нижнего полупространства: $\rho_2 \approx 2,1 \text{ г/см}^3$, $c_2^{II} \approx 1800 \text{ м/с}$. Для учета поглощения скорость звука в грунте при расчете принималась комплексной — $c_1^{II} = 0,05c_1^I$ и $c_2^{II} = 0,02c_2^I$, причем $c_n^I \approx |c_n^I|$. После определения основных параметров двухслойной модели грунта для нее по соответствующей формуле были рассчитаны частотные и угловые характеристики модуля коэффициента отражения, результаты которых на рис. 2, а, б представлены сплошными кривыми. Таким образом, обоснована возможность восстановления параметров газонасыщенного слоя.

2. НАКЛОННОЕ ПАДЕНИЕ ОГРАНИЧЕННОГО ПУЧКА НА ГАЗОНАСЫЩЕННЫЙ СЛОЙ

Проведенный выше анализ основан на рассмотрении падения квазиплоской волны. На практике наибольший интерес представляет излучение и распространение ограниченных волновых пучков. В общем случае такой пучок падает под некоторым углом на границу слоя. В этом случае нужно уметь описывать наклонное распространение волны под углом к начальной

плоскости. При нормальном падении задача сводится к выводу и решению уравнения Хохлова–Заболотской. При его выводе используется разложение пространственного спектра в ряд Тейлора вблизи направления распространения пучка. Однако при наклонном распространении этот подход оказывается применим либо при малых углах наклона, либо для пучков со все более узким спектром по мере увеличения угла. Поэтому наиболее перспективным методом расчета поля является замена точного пространственного спектра $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ на качественно близкий к нему модельный. При этом формально теряется точность описания спектра, характерная для разложения Тейлора, однако, модельный спектр оказывается равномерно пригодным по ширине спектра и углу наклона. В качестве модельного спектра предлагается использовать функцию $k_z = k - \frac{k_x^2}{2k} - \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} \frac{k_y^2}{k}$ [5]. Как видно, коэффициенты этого уравнения остаются конечными при любом угле наклона θ , что не налагает дополнительных ограничений на узость спектра, при $k_y = k \sin \theta$ значение модельного спектра совпадает с точным значением, а параболическая модель позволяет построить эволюционное уравнение для наклонного распространения ограниченного интенсивного пучка в среде с пузырьками:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\varepsilon}{\rho_{\text{eff}} c_{\text{eff}}^3} p \frac{\partial p}{\partial \tau} - b \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} - B \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} \right) = \frac{c}{2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + 2 \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right). \quad (1)$$

Здесь помимо модельного дифракционного оператора учтена нелинейность, диссипация и дисперсия волн в среде с пузырьками. Эффективный нелинейный параметр определяется выражением $\varepsilon = \varepsilon_g \frac{\beta^2 \nu}{(1 + \beta \nu)^2}$ и может быть большой величиной даже при достаточно малых концентрациях пузырьков ν . Здесь ε_g — нелинейный параметр газа, $\beta = \rho c^2 / \rho_g c_g^2$ — отношение сжимаемостей.

Решение уравнения (1) представляет большую сложность. Эффективным является приближение нелинейной геометрической акустики (НГА), но оно неприменимо вблизи фокусов и каустик и, в частности, не позволяет описать поле в звуковом канале. Поэтому для решения нелинейного уравнения (1) можно применить следующий подход [1]. Вначале линеаризуем уравнение (1) и отыскиваем его решение для заданной на границе среды формы пучка и некото-

рой характерной нижней частоты сигнала. Фаза ψ этого решения является решением «полного» уравнения эйконала, учитывающего дифракцию. Далее по аналогии с подходом НГА отыскиваем решение вида $p = p(T = \tau - \psi/c_{\text{eff}}, x, y, z)$, но с заранее определенной функцией ψ . В итоге приходим к двум уравнениям — эйконала и переноса. Поскольку в лучевом приближении уравнение эйконала в линейном и нелинейном случаях имеют одинаковый вид, то для построения лучей можно использовать фазу линейного решения ψ . Такой подход обоснован, поскольку для высших гармоник, возникающих за счет нелинейности, дифракционные эффекты выражены слабее. При этом в уравнении переноса появляется слагаемое, связанное с различием искажения поперечной формы пучка в линейном и нелинейном случаях. На первом этапе этим различием можно пренебречь и в итоге получить уравнение (для двумерного пучка):

$$\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\varepsilon p}{\rho_{\text{eff}0} c_{\text{eff}0}^3} \frac{\partial p}{\partial \tau} - b \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} - B \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} + 2 \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} + p \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

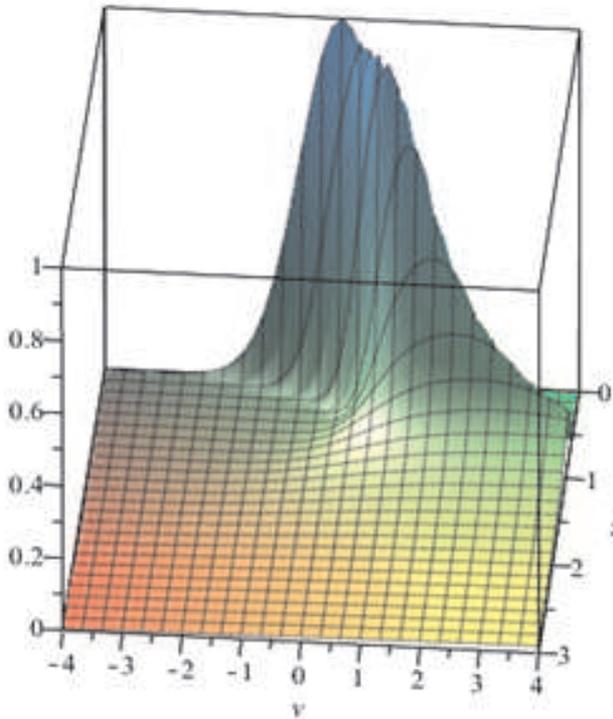


Рис. 3: Изменение поперечной формы исходного гауссовского пучка при наклонном падении

Фаза ψ учитывает дифракционные эффекты для основной частоты исходного сигнала, поэтому уравне-

ние переноса (2) корректно описывает области фокусов и каустик нелинейных фокусированных пучков. Преимуществом такого уравнения является возможность построения его общего точного решения для произвольного начального условия. На рис. 3 представлено изменение формы исходного гауссовского пучка при наклонном падении на слой с пузырьками на основе уравнения (2). Видно, что пучок испытывает снос в поперечном направлении, а также расплывание, которое преобладает на больших расстояниях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе исследованы особенности формирования акустических полей в слоистой газонасыщенной среде, продемонстрирована возможность восстановления структуры и параметров такой среды на основе натуральных данных, выведены нелинейные эволюционные уравнения для различных положений источника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-02-00764, 16-29-02046), а также гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ № НШ-7062.2016.2.

[1] Гусев В. А., Руденко О. В. Акуст. журн. 2015. **61**, № 2. С. 169.
 [2] Шагапов В. Ш., Саранулова В. В. Акуст. журн. 2015. **61**, № 1. С. 40.
 [3] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.

[4] Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н., Иванов В. Е. Акуст. журн. 1979. **25**, № 4. С. 507.
 [5] Гусев В. А., Окунев А. О. Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2015. № 4. 154321.

Acoustic fields in the layered gas-saturated medium

B. I. Goncharenko, V. A. Gusev^a

¹Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
 E-mail: ^aogusev@bk.ru

The propagation of acoustic waves and bounded beams in layered inhomogeneous medium containing gas bubbles is studied. Such system models, in particular, the acoustic processes in freshwater ponds bottom soil that contains gas-saturated sedimentary rocks. It is shown that the sound speed in gas-saturated soil is determined by amount of containing gas. If amount of gas increase to about 1% of the total volume of sediment the sound speed drops to 100 m/s, i.e. in 15 times in comparison with the sound speed

in water. The reflection and transmission coefficients of acoustic waves from layered gas-saturated medium and their dependence on frequency and angle of wave incidence are calculated. A comparison with the experimental results is made. It is shown that the frequency dependence of the module of the sound reflection coefficient received at one of the areas of the Klyazminsky reservoir, has an oscillating character, and the oscillation frequency depends on the thickness of gas-saturated layer and does not depend on the incidence angle. The possibility of recovery of the structural parameters of layered soil on this frequency dependence is shown. Nonlinear acoustic effects associated with a strong structural nonlinearity of a liquid with bubbles are studied. Different cases of the sound source location relative to the bottom soil boundary are considered and evolution equations for the cases of horizontal and oblique propagation of intense waves are derived. Wave profiles and the transverse form of beams are calculated.

PACS: 43.30.+m, 43.25.+y, 47.55.dd, 47.40.Nm.

Keywords: gas-saturated layer, gas bubbles, nonlinear beams.

Received 08 July 2017.

Сведения об авторах

1. Гончаренко Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, тел. (496) 939-29-69, e-mail: goncharenko@phys.msu.su.
 2. Гусев Владимир Андреевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-43, e-mail: vgusev@bk.ru.
-