

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Особенности формирования акустического поля воздушного источника в мелком водоеме с газонасыщенным слоем осадковБ. И. Гончаренко,^{1,2,а} А. А. Павловский,^{1,б} А. С. Шуруп^{1,3,2,в}¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123995, Москва, ул. Большая Грузинская, д.10, стр. 1*³ *Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН. Россия, 117218, Москва, Нахимовский пр. 36*

Поступила в редакцию 26.04.2022, после доработки 14.06.2022, принята к публикации 22.06.2022.

Проведено численное исследование влияния газонасыщенного слоя в дне на формирование акустического поля воздушного источника в водном слое мелкого водоема. Анализ скалярно–векторной структуры звукового поля в волноводах с различными параметрами показал, что при наличии воздушного звукового источника в водном слое на низких частотах формируется интерференционная структура звукового поля, характер которой зависит от наличия газонасыщенного слоя в дне. Интерференционная структура содержит последовательность локализованных минимумов, в которых наблюдаются вихри потока акустической мощности, пространственное распределение которых определяется параметрами волновода. С одной стороны, это ограничивает возможности восстановления угла места на воздушный источник при измерении акустического поля в водном слое в случае неизвестного дна. С другой стороны, открываются возможности оценки параметров дна на основе анализа скалярно–векторной структуры акустического поля, формируемого в водном слое контролируемым воздушным источником.

Ключевые слова: газонасыщенный слой, скалярно–векторные характеристики акустического поля, проникновение звука из воздуха в водную среду, воздушный источник, вихри потока акустической мощности.

УДК: 534.6. PACS: 43.20.Ef, 43.60.Jn, 43.30.Pc.

ВВЕДЕНИЕ

Задача изучения особенностей формирования звукового поля в мелком водоеме с газонасыщенным слоем осадков при излучении звукового поля воздушным источником является актуальной, поскольку позволяет проводить акустический мониторинг воздушного пространства. Решение задачи проникновения звука из воздуха в водную среду в приближении геометрической акустики хорошо известно и получено в работе [1]. Экспериментальные данные проникновения звукового поля пролетающего самолета над поверхностью мелкого моря в водную среду приведены в работе [2], где отмечено хорошее согласие между экспериментом и результатами расчета. Представляет интерес работа [3], в которой приведены расчеты и экспериментальные данные по исследованию распространения звука в слое воды пресноводного водоема и в воздухе при размещении излучателя в воздухе над поверхностью воды. Авторами показано, что звуковое поле в воздухе определяется в основном суперпозицией волны прямой и отраженной от поверхности воды. В водном слое, толщина которого мала для существования волноводного распространения, звуковое поле в основном определяется суперпозицией двух волн: боковыми волнами и быстро затухающими с расстоянием неоднородными нормальными волнами. Также отмечено, что на близких расстояниях и высоких частотах затухающие моды могут обу-

словливать интерференционные осцилляции кривых распределения амплитуды звукового давления по глубине и по расстоянию. С увеличением расстояния эти осцилляции сглаживаются.

В работе [4] приводятся данные по изучению формирования скалярно–векторных характеристик звукового поля в прибрежной акватории мелкого моря источником, расположенным в воздухе. Наблюдалось резкое увеличение уровня сигнала, регистрируемое в точке наблюдения при движении воздушного источника вблизи береговой черты. Объяснение этого явления приведено в работе [5]. Автор отмечает, что наблюдаемые эффекты обусловлены направленностью поля, прошедшего сигнала из воздуха в воду и структурой нормальной волны в клине в окрестности ее каустики. Величина увеличения уровня сигнала зависит от глубины точки приема и существенным образом от структуры дна. Таким образом, определяющим фактором, влияющим на формирование звукового поля в мелкой воде, возбуждаемого расположенным в воздухе источником, является структура и параметры дна.

Наличие в дне газонасыщенного слоя, что характерно не только для акваторий пресноводных водоемов, но и для некоторых шельфовых районов арктических морей [6, 7], приводит к характерным особенностям при распространении звукового поля в водном слое. Например, наличие такого слоя в дне вызывает значительное понижение скорости звука в донном слое, а также приводит к существенному увеличению затухания низкочастотных акустических волн в водном слое [8–12]. Особенности затухания скалярно векторных характеристик

^а E-mail: goncharenko@phys.msu.ru^б E-mail: pavlovskiy.aa@physics.msu.ru^в E-mail: shurup@physics.msu.ru

звукового поля в водном слое и осадках мелкого моря обсуждались в работе [13].

Целью настоящей работы является изучение влияния придонного газонасыщенного слоя осадков в мелководном волноводе на формирование звукового поля, возбуждаемого расположенным в воздухе источником, а также на оценку его угла места при использовании скалярно-векторных характеристик акустического поля, зарегистрированных в водном слое.

Для решения поставленной задачи рассмотрим особенности спектрального состава шума, излучаемого летательными аппаратами (ЛА).

Многообразие конструкций ЛА предполагает различные механизмы возбуждения, уровни и спектральный состав генерируемого акустического шума. Основным источником излучаемого шума является силовая установка ЛА, состоящая из различного рода двигателей и воздушных винтов, количество, конструкция и компоновка которых также может различаться. В работах показано [14–17], что основной спектр шума винтовых двигателей летательного аппарата представляет собой суперпозицию дискретного низкочастотного спектра шума вращения и сплошного широкополосного высокочастотного вихревого шума, а для турбореактивных двигателей преобладает широкополосный шум, с отсутствием характерных дискретных составляющих. Существует направленность излучения звука, в результате которой формируется так называемая «боксовая направленность», величина которой, например, для самолетов с турбореактивными двигателями может достигать 3.5 дБА [15].

В работах [16, 17] приведены экспериментальные данные измерения спектральных характеристик шума турбовинтового самолета, когда он пролетал над микрофоном, установленным в воздухе чуть выше уровня земли, и гидрофоном, установленным на глубине 20 м в водном слое. Как в атмосфере, так и в водном слое океана зафиксированы гармоники лопастей винта самолета частотой 68 Гц, а также наличие доплеровских эффектов в звуковой волне.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

При численном моделировании рассматривается воздушный квазимонохроматический источник (аналог сигнала винтового ЛА), а также мелководный волновод с особенностью в виде газонасыщенного донного слоя. В водном слое одновременно регистрируются амплитуды звукового давления и трех взаимноортогональных компонент колебательной скорости частиц среды. При моделировании используется стандартный метод конечных элементов (МКЭ) для решения уравнения Гельмгольца в неоднородной среде. Рассматривается цилиндрически симметричная задача. Исследуемая модель многослойного волновода в вертикальном сечении (z, r) представлена на рис. 1, где цифрами 1–4 обозначены: 1 — воздушное полупространство, 2 — водный слой, 3 — слой газонасыщенных осадков, 4 — однородное упругое полупространство; величины $c_n, \rho_n, n = 1, \dots, 4$,

обозначают скорость звука и плотность в соответствующих слоях; h_s — высота источника над поверхностью воды; h_r — глубина расположения приемника; H_1, H_2 — толщины водного слоя и слоя осадков соответственно. В рассматриваемом сечении (z, r) цилиндрической системы координат (зависимость от полярного угла отсутствует) источник имеет координаты $(h_s, 0)$, а приемник $(-h_r, R)$.

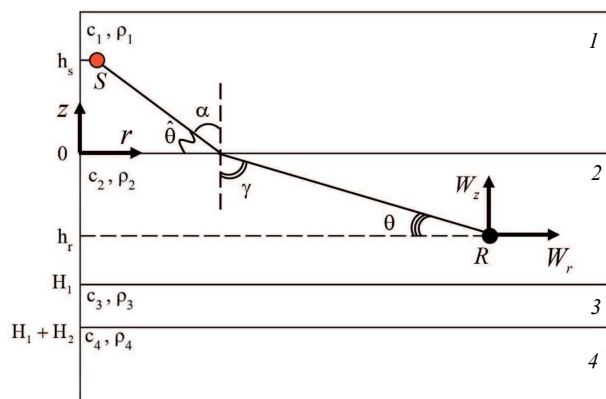


Рис. 1. Модель многослойного волновода в вертикальном сечении (z, r) . Цифрами 1–4 обозначены: 1 — воздушное полупространство, 2 — водный слой, 3 — слой газонасыщенных осадков, 4 — однородное упругое полупространство; величины $c_n, \rho_n, n = 1, \dots, 4$ — скорость звука и плотность в соответствующих слоях; h_s — высота источника S над поверхностью воды; h_r — глубина расположения приемника R , H_1, H_2 — толщины водного слоя и слоя осадков, соответственно. По данным с приемника рассчитываются проекции вектора потока акустической мощности W_z, W_r , позволяющие оценить направление θ прихода энергии акустической волны в волноводе и оценить угол места на воздушный источник θ ; α, χ — углы падения и преломления волн на границе воздух–вода.

При численном моделировании параметры волновода выбирались приближенными к характеристикам Клязьминского водохранилища, где ранее экспериментально изучались особенности распространения звука в водном слое при наличии газонасыщенного дна [8]: глубина водного слоя предполагалась равной $H_1 = 8$ м, толщина газонасыщенного слоя $H_2 = 0.7$ м; скорость звука в воздухе принималась равной $c_1 = 343$ м/с, в воде $c_2 = 1500$ м/с, в газонасыщенном слое скорость звука принималась равной $c_3 = 100$ м/с, также учитывалось поглощение путем введения мнимой части: $c_n = c'_n - ic''_n, \delta_n = c''_n/c'_n$, где n — номер слоя, откуда $c_3 = 100 - 5i$ м/с. В дне с учетом поглощения скорость звука составляла $c_4 = 2100 - 105i$ м/с. Таким образом, поглощение в каждом слое можно обозначить как $\delta_1 = \delta_2 = 0, \delta_3 = \delta_4 = 5\%$. Плотности воздуха, водного и газонасыщенного слоев, а также дна составляли $\rho_1 = 1.27$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_3 = 1600$ кг/м³, $\rho_4 = 2100$ кг/м³ соответственно. Скорость поперечных волн в упругом полупространстве составляла 1700 м/с. Следует отметить, что рассматриваемый в работе случай газонасыщенного дна, т.е. случай, когда в дне присутствуют пузырьки газа, является хорошо известной особенностью мелких водоемов [8, 9]. Основным газом, содер-

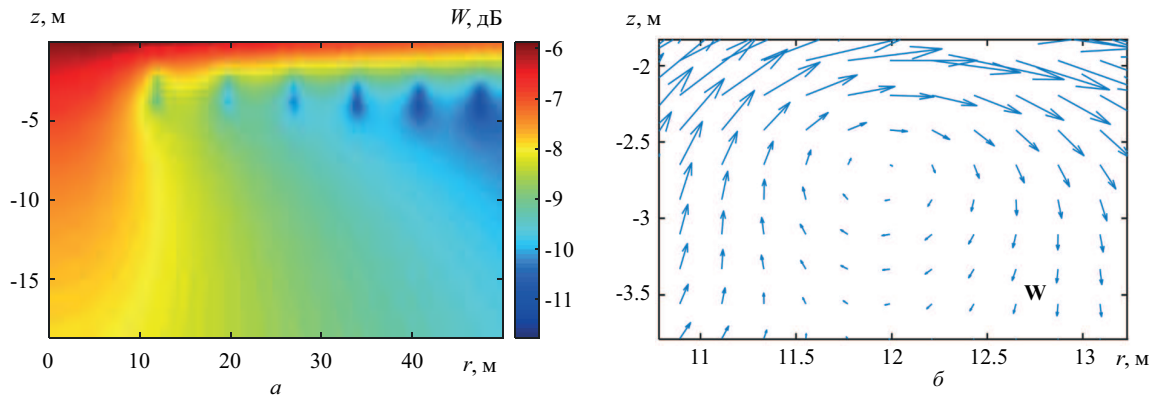


Рис. 2. Пространственное распределение модуля спектра потока акустической мощности $W = \sqrt{W_z^2 + W_r^2}$ при наличии границы раздела воздух–вода: *a* — вихревая структура векторного поля потока акустической мощности $W = (W_r, W_z)$ в зоне первого интерференционного минимума (*б*), характеризующего направление переноса энергии в звуковой волне

жащимся в осадках пресных водоемов, например озер, водохранилищ, является метан. Как показали расчеты и экспериментальные данные, при увеличении содержания газа до 1% от общего объема грунта скорость звука уменьшается до 100 м/с, т.е. снижается почти в 15 раз по сравнению со скоростью звука в воде [8, 9].

В качестве источника звука использовался точечный монополярный источник с частотой излучения $f_0 = 68$ Гц. Значение частоты выбрано из диапазона значений, в которых может лежать частота первой гармоники винтового самолета [16, 17]. Источник звука находился на высоте $h_s = 10$ м. Глубина погружения звукоприемника принималось некоторому значению h_r , которое варьировалось в пределах $(0 \dots -H_2)$. Одной из особенностей модели с использованием МКЭ является введение так называемого идеально согласованного слоя (Perfectly Matched Layer, PML). Введение такого слоя обеспечивает поглощение всех волн в выбранной модели, не допуская отражений от внешних границ. Это позволяет моделировать бесконечные полупространства 1 и 4, а также неограниченные в горизонтальном направлении слои 2 и 3.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ ОДНОРОДНОГО ЖИДКОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

На первом этапе проводимых исследований рассматривалось однородное водное полупространство при $z < 0$ (рис. 1). При наличии границы раздела воздух–вода появляются отраженные от этой границы и преломленные волны, взаимодействие которых приводит к весьма неоднородной интерференционной структуре звукового поля даже в рассматриваемом упрощенном случае (рис. 2). Угол полного внутреннего отражения (критический угол) для границы воздух–вода несложно вычислить из соотношения $\sin \alpha_{кр} = c_1/c_2 \cong 0.23$, откуда $\alpha_{кр} \cong 13.2^\circ$. В итоге лишь при малых углах падения волны от воздушного источника звуковая волна проходит в воду. Вместе с тем при построении пространственных спектров полей воздушного источника наблюдается интерференционная структура поля, которая проявлялась

в водном слое в виде чередования локализованных минимумов и максимумов и наблюдается на значительном горизонтальном удалении от источника в точках, соответствующих закритическим углам падения (рис. 2, *a*). Наблюдаемые особенности звукового поля могут соответствовать интерференции волн, распространяющихся в водном слое и в воздухе. Анализ литературы по данной теме показал, что похожий эффект ранее уже обсуждался в [23–25], где было показано, что в таких областях могут возникать сингулярности волнового фронта — «дислокации». В их окрестностях присутствуют особенности в виде возникновения вихрей вектора интенсивности [26] как в ближнем, так и в дальнем полях источника. Кроме этого, направление переноса энергии сигнала в горизонтальной плоскости (от источника к приемнику) в локальной области вихревого поля может случайным образом измениться на обратное [27]. Следует отметить, что в отмеченных работах рассматривался случай подводного источника, ниже приводятся результаты численного исследования дислокаций акустического поля от воздушного источника.

Для анализа пространственного распределения скалярно–векторной структуры акустического поля в водном слое был построен двумерный разрез модуля потока акустической мощности $W = \sqrt{W_z^2 + W_r^2}$, где $W_z = \frac{1}{2} Re(p^* V_z)$, $W_r = \frac{1}{2} Re(p^* V_r)$, а V_z, V_r — вертикальная и горизонтальная компоненты колебательной скорости соответственно; давление p и проекции колебательной скорости V_z, V_r представляют собой спектральные амплитуды, то есть комплексные величины; символ «*» обозначает комплексное сопряжение. Результаты расчета пространственного распределения модуля потока акустической мощности приведены на рис. 2, *a*, где воздушное полупространство для наглядности эффектов, наблюдаемых в водном слое, не показано. На рис. 2, *a* хорошо наблюдается интерференционная структура в виде последовательности локализованных минимумов. В областях этих минимумов было построено векторное поле потока акустической мощности W с компонентами (W_r, W_z) , характеризующее направления переноса энергии в звуковой

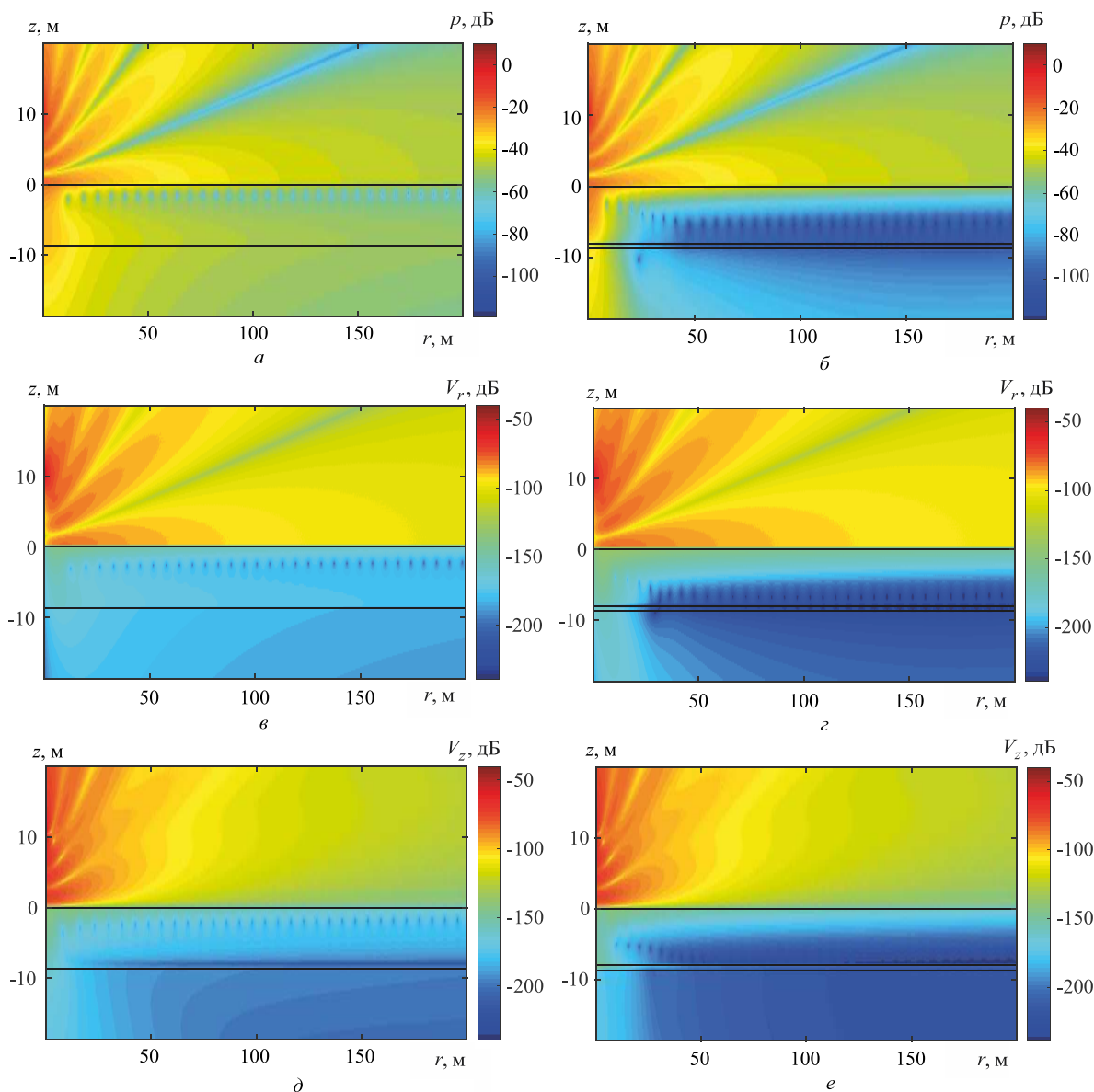


Рис. 3. Пространственное распределение спектра звукового давления p в отсутствие газонасыщенного слоя (а), и при его наличии (б). То же для горизонтальной компоненты колебательной скорости V_r (в, г), и вертикальной компоненты V_z (д, е)

волне. В качестве примера на рис. 2, б приведено распределение векторного поля W в окрестности первого минимума, демонстрирующее, что в области дислокаций поля возникают завихренности вектора потока акустической мощности, приводящие к необычному локальному эффекту — энергия в звуковой волне переносится в направлении к источнику этой волны. Таким образом, полученные результаты численного моделирования соответствуют известным результатам [23–27] для подводного источника. Далее рассматривается влияние дна на пространственное распределение дислокаций поля от воздушного источника с учетом особенности в виде слоя газонасыщенных осадков.

3. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ ДНА В ВИДЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВА С ГАЗОНАСЫЩЕННЫМ СЛОЕМ

На рис. 3 представлены пространственные распределения спектров давления p (рис. 3, а, б)

и компонент колебательной скорости V_r (рис. 3, в, г), V_z (рис. 3, д, е) в водном слое и в дне без газонасыщенного слоя (рисунки слева) и при его наличии (рисунки справа). Следует отметить, что в водном слое пространственные спектры полей давления p (рис. 3, а, б) и горизонтальной компоненты колебательной скорости V_r (рис. 3, в, г), практически совпадают и не зависят от наличия газонасыщенного слоя в дне. На всем рассмотренном горизонтальном расстоянии в водном слое наблюдаются интерференционные полосы. На пространственном спектре поля вертикальной компоненты колебательной скорости V_z (рис. 3, д, е) интерференция существует до горизонтального расстояния примерно 100 м, а далее наблюдается диффузное поле, и эта особенность не зависит от наличия газонасыщенного слоя в дне.

В донном пространстве по всем компонентам колебательной скорости при отсутствии газонасыщенного слоя наблюдается интерференция на всем рассмотренном горизонтальном расстоянии. При на-

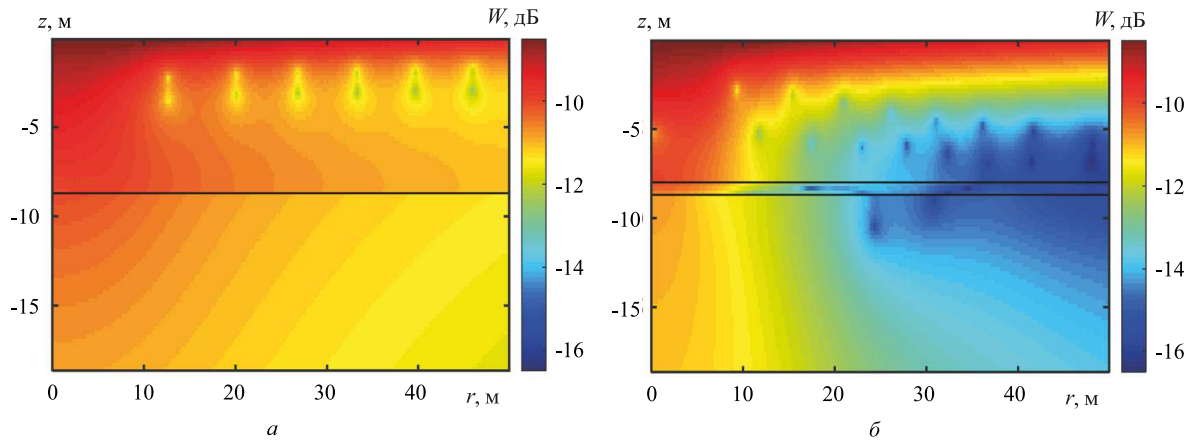


Рис. 4. Пространственное распределение модуля спектра потока акустической мощности $W = \sqrt{W_z^2 + W_r^2}$ в водном слое и дне: (а) в отсутствие слоя газонасыщенных осадков (б) при наличии газонасыщенного слоя

личии газонасыщенного слоя интерференция по полю давления p наблюдается на всем рассмотренном горизонтальном расстоянии, в то время как по полю V_r и V_z на расстоянии более 50 м интерференция не наблюдается.

Как видно на рис. 3, наличие газонасыщенного слоя существенно изменяет структуру скалярно-векторных компонент акустического поля в водном слое — зоны интерференционных минимумов смещаются вниз от границы вода-дно. Более заметно такое смещение интерференционных минимумов по полю звукового давления.

На рис. 4 демонстрируются особенности формирования модуля потока акустической мощности $W = \sqrt{W_z^2 + W_r^2}$ в отсутствие и при наличии газонасыщенного водного слоя. При отсутствии газонасыщенного слоя в дне в водном слое наблюдается точечная интерференционная структура в виде последовательности минимумов через равные пространственные промежутки. В дне точечная интерференционная структура отсутствует. При наличии газонасыщенного слоя в дне в водном слое остается точечная интерференционная структура в виде последовательности минимумов, и она смещается вниз по направлению к газонасыщенному слою, однако периодичность не наблюдается. Кроме того, точечная интерференционная структура в виде последовательности минимумов наблюдается в донном полупространстве и в газонасыщенном слое.

Полученные результаты указывают на заметное влияние газонасыщенного слоя на скалярно-векторную структуру акустического поля воздушного источника в водном слое. Это, в свою очередь, указывает на возможности восстановления параметров дна по данным в виде пространственного распределения дислокаций акустического поля при использовании контролируемого воздушного источника. Идея о дислокационной акустической диагностике не является новой и обсуждалась ранее в контексте решения задач томографии океана [23, 24], но по данным от подводных источников. Следует также отметить, что в областях, соответствующих расположению интерференционных минимумов, отношение сигнал/помеха мало, а обработка записанных

сигналов и их анализ весьма затруднены. Вместе с тем анализ обсуждаемых особенностей скалярно-векторного поля, формируемых воздушным источником под водой, представляет несомненный интерес.

4. ВЛИЯНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО СЛОЯ ОСАДКОВ НА ОЦЕНКУ УГЛА МЕСТА ВОЗДУШНОГО ИСТОЧНИКА

Один из наиболее часто используемых методов определения местоположения воздушного источника (преимущественно, винтовых летательных аппаратов) из-под воды основан на эффекте Доплера [17, 18]. Вместе с тем локация источника возможна и на основе векторно-фазовых методов обработки акустических полей, основанных на применении комбинированных приемных модулей (КПМ), содержащих приемник звукового давления и векторный приемник, позволяющий регистрировать три ортогональные компоненты колебательной скорости [4, 19]. Различные способы определения местоположения источника звука в волноводе, используя скалярно-векторные характеристики поля, хорошо известны и подробно рассмотрены в работе [19]. В принципе местоположение источника звука в волноводе возможно также определить методом максимального правдоподобия (методом Кейпона) [20] и сравнительно новым интерферометрическим методом [21], каждый из которых имеет свои особенности.

Ниже рассматривается влияние подводного грунта с газонасыщенным слоем на оценку угла места воздушного источника по данным о проекциях потоков акустической мощности, зарегистрированным в водном слое с помощью КПМ. Под углом места $\hat{\theta}$ будем понимать угол между направлением на источник звука в воздухе и плоскостью горизонта (рис. 1).

В случае однородной безграничной среды в рассматриваемой постановке задачи (рис. 1) угол места θ источника звука можно определить, измеряя компоненты акустического поля p , V_r и V_z и вычисляя отношения горизонтальной W_r и вертикальной W_z проекции потока акустической мощности: $\theta = \pi - \arctan(W_r/W_z)$. При наличии границы воздух-вода угол места $\hat{\theta}$ (здесь для

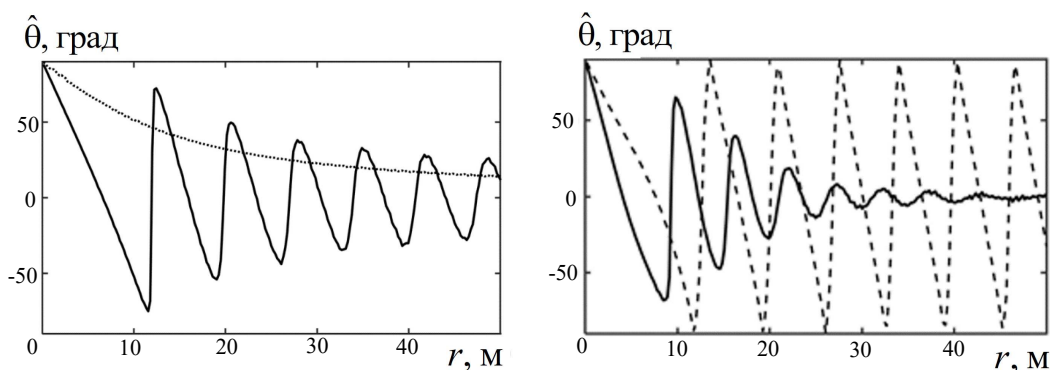


Рис. 5. Зависимости угла места $\hat{\theta}$ воздушного источника от горизонтального расстояния r между источником и приемником при $h_r = -2.65$ м. Точками на (а) обозначен угол места источника в однородном пространстве, сплошной линией — при наличии водного полупространства. Результаты расчета $\hat{\theta}$ при наличии дна изображены на (б): пунктирной линией без газонасыщенного слоя в дне, сплошной линией — при его наличии

отличия от случая однородной безграничной среды используется $\hat{\theta}$ вместо θ) может быть рассчитан как $\hat{\theta} = \pi/2 - \arcsin(c_1/c_2 \sin(\pi/2 - \theta)) = \arccos(c_1/c_2 \cos \theta)$, где $\theta = \pi - \arctan(W_r/W_z)$ и предполагается справедливость закона Снеллиуса $c_1/\sin \alpha = c_2/\sin \gamma$, α и γ — углы падения звуковой волны от воздушного источника и преломления звуковой волны, прошедшей в водную среду, соответственно.

В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости угла места $\hat{\theta}$ от горизонтального расстояния r , при этом глубина расположения КПМ выбиралась равной $h_r = -2.65$ м, где наблюдались минимумы интерференционной структуры. На рис. 5 наблюдается эффект искажения оценки угла места, связанный с описанными выше особенностями скалярно-векторной структуры (рис. 2, б), когда перенос энергии за счет наблюдаемой завихренности потока акустической мощности может осуществляться даже по направлению к источнику. Видно, что изменение угла на противоположный происходит на расстояниях, соответствующих расположению интерференционных минимумов (рис. 2, а).

Наблюдаемые особенности формирования скалярно-векторной структуры акустического поля в ограниченных волноводах исследовались в работах [27, 28], в которых, в частности, показано, что целесообразно использовать характеристики звукового поля в зонах интерференционных максимумах для решения различных практических задач. В рассмотренном нами примере отметим, что также следует оценивать характеристики воздушного источника не в зонах минимумов, а в зонах максимумов акустического поля, т.к. в них существенно выше отношение сигнал/помеха [28].

Из представленных на рис. 5 данных видно, что, ввиду сложной интерференционной структуры звукового поля в водном слое, становится невозможным адекватно оценивать угол места воздушного источника, если звукоприемник оказывается расположенным в области, где наблюдаются минимумы интерференционной структуры звукового поля в виду присутствия в этих областях завихренностей скалярно-векторной структуры регистрируемого поля. При этом наблюдаемых на рис. 5 осцилляций удается избежать при изменении глубины распо-

ложения звукоприемника. В случае присутствия газонасыщенного слоя, когда дислокации смещаются ближе к дну (рис. 3), следует уменьшать глубину приема сигнала. Если же газонасыщенный слой отсутствует, то дислокации поля наблюдаются, наоборот, на малых глубинах и прием акустического сигнала имеет смысл наоборот вести вблизи дна.

Следует отметить, что на рис. 5, б наблюдается зависимость периода осцилляций угла места воздушного источника от наличия и отсутствия газонасыщенного слоя осадков в дне, что, в свою очередь, указывает на различный период пространственного расположения дислокаций. Тем самым наблюдается различие в пространственном расположении дислокаций скалярно-векторной структуры поля (разная глубина, разный пространственный масштаб, разное количество дислокаций) для разных свойств дна. Это непосредственно указывает на возможность оценки характеристик волновода на основе анализа скалярно-векторной структуры акустического поля при использовании контролируемого воздушного источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках численного моделирования исследовано влияние газонасыщенного слоя в дне на формирование акустического поля от воздушного источника в водном слое мелкого водоема. Проведенный анализ скалярно-векторной структуры звукового поля в волноводах с различными параметрами показал, что при наличии воздушного звукового источника в водном слое на низких частотах формируется интерференционная структура звукового поля. Она содержит последовательность локализованных минимумов, в которых наблюдаются вихри потока акустической мощности. Это ухудшает возможности восстановления угла места на воздушный источник при измерении акустического поля в водном слое. Полученные результаты демонстрируют необходимость учета характеристик дна при восстановлении угла места на воздушный источник. В общем случае необходимо учитывать неравномерное распределение характеристик дна реального волновода вдоль трассы распространения, например неоднородностей плотности в слое осадков водоема, что, несомненно,

будет влиять на формирование акустического поля. Вместе с тем полученные в работе результаты указывают на возможность исследования параметров дна на основе анализа скалярно–векторной структуры акустического поля, формируемого в водном слое контролируемым воздушным источником.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06048.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
2. Urick R.J. // J. Acoust. Soc. Amer. 1972. **52**. P. 993.
3. Кудрявцев О.В., Бычихин В.И. // Сб. докл. VII Всесоюзной науч.-техн. конф. по информационной акустике. М., 1981. С. 156.
4. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Захаров Л.Н., Ильичев В.И. // Докл. РАН. 1993. **333**. С. 503.
5. Комиссарова Н.Н. // Акуст. журн. 2001. **47**, № 3. С. 370.
6. Веденев А.И., Луньков А.А., Шатравин А.В., Кочетов О.Ю. // Доклады XVI Школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXXI сессией Российского акустического общества. 2018. С. 177.
7. Григорьев В.А., Петников В.Г., Шатравин А.В. // Акуст. журн. 2017. **63**, № 4. С. 389.
8. Гончаренко Б.И., Захаров Л.Н., Иванов В.Е. // Акуст. журн. 1979. **25**, № 4. С. 507.
9. Гончаренко Б.И., Гусев В.А. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2017. № 5. 1750110.
10. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терёхина Я.Е. // Акуст. журн. 2018. **64**, № 3. С. 342.
11. Рожин Ф.В., Тонаканов О.С. Общая гидроакустика. Изд. МГУ, 1988.
12. Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. // Акуст. журн. 2015. **61**, № 1. С. 90.
13. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. // Акуст. журн. 2017. **63**, № 6. С. 614.
14. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф. // Ученые записки ЦАГИ. 2014. **45**, № 2. С. 136.
15. Буторина М.В. // Noise Theory and Practice. 2020. **6**, № 2. С. 49.
16. Ferguson B.G. // J. Acoust. Soc. Am. 1992. **92**. P. 1403.
17. Ferguson B.G. // IEEE Journal of Ocean. Engin. 1996. **21**, № 4. P. 537.
18. Zhao A., Bi X., Hui J., Zeng C. et al. // Sensors. 2017. **17**, N 11. P. 2619.
19. Гордиенко В.А. Векторно–фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007.
20. Буров В.А., Касаткина Е.Е. // Акуст. журн. 1997. **43**, № 1. С. 22.
21. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. // Акуст. журн. 2018. **64**, № 1. С. 33.
22. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960.
23. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. // Акуст. журн. 1989. **25**, № 2. С. 260.
24. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А., Петников В.Г. и др. // Акуст. журн. 1993. **39**, № 4. С. 764.
25. Елисеев В.А., Тужилкин Ю.И. // Акуст. журн. 2001. **47**, № 6. С. 781.
26. Шуруп В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. // Акуст. журн. 2011. **57**, № 6. С. 837.
27. Шуруп В.А., Ляшков А.С., Щеглов С.Г., Ткаченко Е.С. и др. // Подводные исследования и робототехника. 2014. **17**, № 1. С. 58.
28. Белова Н.И., Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. // Акуст. журн. 2016. **62**, № 3. С. 318.

Specific Features in the Formation of an Acoustic Field from an Air Source in Shallow Water with a Gas-Saturated Layer of Sediments

B.I. Goncharenko^{1,3,a}, A.A. Pavlovskiy^{1,b}, A.S. Shurup^{1,2,3,c}

¹Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow 117997, Russia

³Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia

E-mail: goncharenko@phys.msu.ru, pavlovskiy.aa@physics.msu.ru, shurup@physics.msu.ru

—The effect of a gas-saturated layer in the bottom on the formation of an acoustic field from an air source in the water layer of shallow water is numerically studied. The analysis of the scalar-vector structure of an acoustic field in waveguides with different parameters shows that an interferential acoustic field structure, whose character depends on the presence of a gas-saturated layer on the bottom, is formed in the presence of a air sound source in the water layer at low frequencies. The interferential structure contains a sequence of local minima, in which acoustic power flux vortices with a spatial distribution governed by waveguide parameters are observed. On the one hand, this limits the possibilities of restoring the elevation angle of an air source when measuring the acoustic field in the water layer in the case of an unknown bottom. On the other hand, this opens opportunities of estimating the bottom parameters by analyzing the scalar-vector structure of the acoustic field formed in the water layer by a controllable air source.

Keywords: gas-saturated layer, scalar–vector characteristics of acoustic field, penetration of sound from the air into a water medium, air source, acoustic power flux vortice.

PACS: 43.20.El, 43.60.Jn, 43.30.Pc.

Received 26 April 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2022. **77**, No. 5. Pp. 762–769.

Сведения об авторах

1. Гончаренко Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-69, e-mail: goncharenko@phys.msu.ru.
2. Павловский Артем Андреевич — выпускник магистратуры; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: pavlovskiy.aa@physics.msu.ru.
3. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, науч. сотрудник, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: shurup@physics.msu.ru.