

УДК 534.222:681.883

Современные методы передачи звуковой энергии в водной среде и их теоретическое развитие

Павел А. Стародубцев*

Роман Н. Алифанов†

Светлана В. Гуторова‡

ТОВМИ имени С.О.Макарова,
Днепровский пер. 7, Владивосток, 690006,

Россия

Получена 07.12.2008, окончательный вариант 22.03.2009, принята 10.05.2009

В работе представлены теоретические исследования современных технологий и методов передачи звуковой энергии в гигагерцевом диапазоне частот, объясняющие физическое явление "быстрого звука" на атомарном уровне в морской среде.

Ключевые слова: методы передачи звуковой энергии в водной среде, быстрый звук

Существующие методы передачи звуковой энергии в водной среде в основном работают для диапазона частот от 20 Гц до (16–20) кГц. Влияние теплопроводности на потери энергии в воде для данного диапазона ничтожно мало в сравнении с другими факторами, и эти потери можно не учитывать. Для этого же диапазона технически реализован и весь спектр существующих излучающих и приемных электроакустических преобразователей (ЭАП) гидроакустических станций.

Для данного диапазона частот чрезвычайно важным классом движений являются такие, в которых молекулы воды совершают финитное (ограниченное) движение вблизи некоторого положения равновесия.

При этом под движением понимается не только его простейшая форма, изменение положения молекул воды, но и любое изменение во времени свойств материи (водной среды), распределенной в пространстве.

Под колебаниями рассматриваются процессы, повторяющиеся (или приблизительно повторяющиеся) во времени.

При распространении звуковой энергии в водной среде возникают и другие очень интересные физические явления, технически не реализованные в современной гидроакустической технике [1]. Аномально высокая скорость распространения высокочастотного ультразвука в воде давно занимает современных физиков.

В обычных условиях скорость звука в воде составляет примерно 1500 метров в секунду (м/с) и не зависит от частоты звуковой волны. Однако уже давно известно, что ультразвуковые колебания с частотой несколько терагерц (1 терагерц = 10¹² Гц (рис.1)) распространяются в воде со скоростью примерно вдвое большей.

*e-mail: spa1958@mail.ru

†e-mail: gidra 518@mail.ru

‡e-mail: uen@mail.ru

© Siberian Federal University. All rights reserved



Рис. 1. Распределения акустических колебаний по частоте

Это явление в теории передачи звука было открыто экспериментально итальянскими учеными 20 лет назад, ссылки на его существование появлялись и при численном моделировании динамики воды на атомарном уровне, но, несмотря на всё это, общепринятого объяснения до сих пор нет [1].

Из двух существующих сегодня теорий, поясняющих это явление, вязкоэластичной и двухкомпонентной, экспериментально подтверждена первая и опровергнута учеными вторая.

В соответствии с первой для звука более высокой частоты вода становится более упругой и всё менее подвижной средой (такие среды называются вязкоэластиками). В результате колебания с такой высокой частотой распространяются скорее через упругую, почти твердую среду, а в твердом теле скорость звука выше, чем в жидкости (скорость звука во льду составляет примерно 3000 м/с).

Вторая теория основана на том факте, что вода состоит из переплетенной сети ионов двух типов: очень легких ионов водорода и тяжелых ионов кислорода. Вычисления показывают, что часто в таких двухкомпонентных средах с сильно различающимися массами существует специальный тип быстрых звуковых волн, которые распространяются исключительно через сеть легких атомов. Эта теория уже хорошо себя зарекомендовала для описания быстрого звука в двухкомпонентных газах и металлических сплавах, и потому кажется естественным, что она будет работать и для воды. Но, как показала практика, это не так [2].

Поэтому основная цель, которая поставлена в данной работе, это поиск ответов, поясняющих данное явление в морской среде.

При этом авторы статьи отталкивались от следующих, достаточно проверенных другими исследователями, положений.

1. Опыты со столь высокочастотным ультразвуком в лабораторных условиях высшего учебного заведения поставить невозможно.
2. Акустические излучатели в этом диапазоне для гидроакустических станций пока не придуманы, и поэтому исследователи могут определить скорость ультразвука только косвенными методами.
3. Обе модели согласуются с имеющимися в акустике экспериментами, однако они совершенно по-разному описывают переход от нормального звука к быстрому, который должен происходить при меньших частотах, в гигагерцевом диапазоне.
4. Для ответа на вопрос, какая из двух моделей верна, требуется измерение зависимости скорости звука от частоты именно в гигагерцевом диапазоне.

Источником гиперзвуковых колебаний (от 10^9 до 10^{13} Гц) в водной среде, по мнению авторов, можно считать тепловые колебания атомов или ионов, интегрируя в общее представление, несмотря на существующие разногласия в результатах, сущность вискоэластичной и двухкомпонентной теорий.

Эти колебания можно рассматривать как тепловой шум или совокупность продольных (для жидкости) и сдвиговых волн (для твердого вещества). При этом процесс распространения звуковой энергии в водной среде не будет адиабатическим. В звуковой волне для гигагерцевого диапазона частот происходит частичный необратимый перенос тепла от мест с более высокой температурой (область сжатия) к местам с более низкой температурой (область разрежения) на атомарном уровне, в отличие от молекулярного уровня и звукового диапазона частот. Электроны легких атомов водорода, теряя свои орбиты под воздействием гигагерцевого излучения и перемещаясь на другие орбиты, генерируют колебания ультразвукового диапазона. Это состояние водной среды для верхней границы гиперзвука является у авторов первым объяснением увеличения скорости звука в воде.

При прохождении акустической волной фиксированной точки пространства происходит нарушение термодинамического равновесия жидкости за счет перемены знака давления (смены сжатия и разрежения), так как при смене полуволн сжатий и разрежений в каждом элементе водной среды происходит изменение атомарной структуры молекул воды (H_2O).

Величина потерь акустической энергии зависит от соотношения времени релаксации и периода звуковой волны. Если время релаксации значительно отличается от периода звуковой волны, то величина потерь энергии за период мала. Если же эти величины близки по величине, то потери максимальны [3].

Это объясняется тем, что в такте сжатия при волновом движении имеют место молекулярные превращения, ведущие к поглощению энергии, и если колебания достаточно медленные, то в такте расширения происходят обратные превращения, успевающие вернуть всю поглощенную энергию. Но если период колебаний оказывается величиной того же порядка, что и постоянная времени молекулярного превращения (время релаксации), то обе стадии превращения оказываются несимметричными, и энергия, поглощенная на одной из них, будет больше энергии, возвращенной на следующей стадии.

В этом случае говорят, что происходит релаксационное поглощение акустической энергии за счет релаксационной структуры на атомарном уровне молекул воды. Время структурной релаксации $\tau_{ср} \approx 10^{-11}$. Соответственно частота структурной релаксации

$$f_{ср} = \frac{1}{\tau_{ср}} \approx 10^5 \text{ мГц.} \quad (1)$$

Коэффициент поглощения, обусловленный релаксационным процессом любой природы, в том числе и структурной релаксацией, определяется эмпирической формулой

$$\alpha_p = \frac{A \cdot f_p \cdot f^2}{f^2 + f_p^2} \text{ дБ/ед. расстояния,} \quad (2)$$

где $A = \frac{8.68 \cdot \pi \cdot F}{C}$; F — коэффициент, учитывающий, какая часть молекул принимает участие в релаксации; f_p — частота структурной релаксации; f — частота звуковой волны; C — скорость звука в воде или та величина, которую необходимо определить.

Выражение (2) допускает следующие упрощения: $\alpha_p \approx A \cdot f_p = \text{const}$ (дБ/ед. расстояния) при $f \ll f_p$, $\alpha_p \approx A \cdot f^2 / f_p = \text{const}$ (дБ/ед. расстояния) при $f \gg f_p$.

В дополнение, по мнению авторов, процесс звуковых колебаний в гигагерцевом диапазоне поясняется также и механизмом химической (ионной) релаксации на примере нарушения термодинамического равновесия, связанного с химическими превращениями сернокислого магния в поле акустической волны. Часть молекул солей, растворенных в морской воде, находится в диссоциированном состоянии, т.е. в виде ионов Mg^{++} , SO_4^{--} , Na^+ , Cl^- , что также подтверждает факт атомарных изменений молекул примесей воды под воздействием гигагерцевого излучения.

При неизменных температуре и давлении число молекул, распадающихся на ионы в единицу времени, равно числу молекул, вновь возникших из ионов при их рекомбинации. При рекомбинации выделяется некоторое количество тепловой энергии с появлением теплового шума, т.е. увеличивается кинематическая энергия молекул воды; движение молекул сопровождается их соударением и приводит к образованию новых ионов, к „раскалыванию“ молекул солей. Процессы диссоциации и рекомбинации находятся в равновесии, которое является термодинамическим. При прохождении акустической волны это равновесие нарушается. В областях пониженного давления равновесное значение степени диссоциации молекул некоторых солей, в том числе соли $MgSO_4$, растет [4].

В областях пониженного давления равновесное значение степени диссоциации молекул ниже, здесь начинается усиленная рекомбинация ионов с постоянной времени рекомбинации около 10^{-5} с. Вследствие этого восстановление равновесия запаздывает по фазе относительно волны давления, и весь процесс приобретает релаксационный характер, что приводит к дополнительным потерям акустической энергии, появлению теплового шума как источника гигагерцевых колебаний и сопутствующему ему явлению "быстрого звука".

В [5] отмечено, что у сильно переохлажденной воды имеются две характерные температуры: $t_h = -36^{\circ}C$ и $t_g = -140^{\circ}C$. Хорошо очищенная и обезгаженная вода в интервале температур $0^{\circ}C > t > t_h$ длительное время может оставаться в состоянии переохлажденной жидкости. При $t_g < t < t_h$ происходит гомогенное зарождение кристалликов льда, и вода не может находиться в переохлажденном состоянии при любой степени очистки [4, 5]. В условиях достаточно быстрого охлаждения при $t_g > t$ подвижность молекул воды настолько падает (а вязкость растет), что она образует стеклообразное твердое тело с аморфной структурой, свойственной жидкостям. При этом в области невысоких давлений образуется аморфная фаза низкой плотности, а в области повышенных — аморфная фаза высокой плотности, то есть вода демонстрирует полиаморфизм. При изменениях давления или температуры одна аморфная фаза скачком переходит в другую с неожиданно большим изменением плотности $>20\%$ [4, 5].

Это также дает определенную возможность объяснить явление повышенной скорости звука в воде для гигагерцевого диапазона частот в воде.

Существует несколько точек зрения на природу полиаморфизма воды. Так, согласно [4, 5], такое поведение сильно переохлажденной воды может быть объяснено, если принять, что в потенциальном профиле взаимодействия двух молекул H_2O имеется не один минимум, а два (рис. 2). Тогда аморфной фазе с высокой плотностью будет соответствовать среднее расстояние r_H , а фазе с низкой плотностью — r_L .

Компьютерное моделирование, представленное в [4, 5], подтверждает такую точку зрения, но надежных экспериментальных доказательств этой гипотезы пока нет, как нет и строгой теории, подтверждающей обоснованность использования двухъямного потенциала для описания столь необычных свойств переохлажденной воды. Поведение переохлажденной воды представляет большой интерес в силу различных причин.

В частности, оно определяет климатические условия, возможность и режим морского судоходства в высоких широтах, что актуально для РФ в связи с освоением природных запасов Северного Ледовитого океана. В процессе динамической кристаллизации на межфазной границе происходит множество интересных и пока малоизученных явлений, например перераспределение примесей, сепарация и последующая релаксация электрических зарядов, сопровождающаяся электромагнитным излучением в широкой полосе частот, и др.

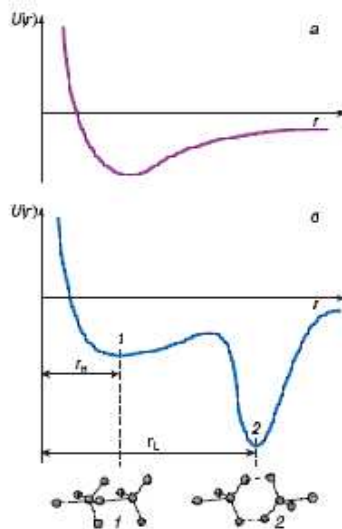


Рис. 2. Гипотетические потенциальные профили: а — с одним максимумом энергии (например, потенциал Леннарда - Джонса $U(r) = A/r^6 - B/r^{12}$); б — с двумя минимумами энергии, которым соответствуют две устойчивые конфигурации кластера из двух взаимодействующих молекул воды (1 и 2) с разными расстояниями между условными центрами молекул r_H и r_L . Первая из них соответствует фазе с большей плотностью, вторая — с меньшей (по [4, 5])

Наконец, кристаллизация в сильно переохлажденной жидкости — прекрасная, легко воспроизводимая многократно модельная ситуация поведения системы, далекой от термодинамического равновесия и в результате развития неустойчивостей к образованию дендритов различного порядка и размерности (типичные представители — снежинки и ледяные узоры на окнах), удобной для создания и моделирования поведения фракталов [6].

Еще одно пояснение теплового шума и явления "быстрого звука", по мнению авторов, связано с "фликкер-шумом" (по-английски flicker значит "мерцание"). Мерцающий, или фликкершум можно представить следующим образом. По поверхности водоема идет высокая и широкая волна, в свою очередь по этой же поверхности распространяются более мелкие волны, поверхность которых бороздит совсем мелкая рябь, и так до бесконечности.

С какого бы расстояния вы ни смотрели на поверхность воды, изображенной такой хитрой комбинацией волн, вы не заметите никаких изменений. Так и белый шум, фликкер-шум оказывается совершенно нечувствительным к изменению масштабов, это и есть то свойство, которое объединяет все истинные шумы и отличает их от любых иных звуков.

Фликкер-шум — неотъемлемая особенность всех систем, далеких от равновесия. Он ин-

интересен тем, что истинно равновесные системы (а тепловой белый шум как раз и характерен для равновесных систем) встречаются в природе крайне редко.

В подавляющем большинстве случаев мы имеем дело с неравновесными системами, либо неудержимо стремящимися к равновесию (молекулы и легкие атомы водорода воды), стареющими, либо поддерживаемыми в стационарном, хотя и неравновесном состоянии за счет обмена энергией и веществом с внешней средой, что характерно для водной среды, возбужденной гигагерцевыми колебаниями [7]. Другой подход к решению проблемы "фликкер-шума" и гигагерцевых колебаний звука связан с недавно открытыми стохастическими процессами. Примером стохастического процесса может служить турбулентность, развивающаяся в потоке жидкости или газа. Стохастичность характерна для систем, в которых возможны колебания, вызываемые наличием обратной связи, что присуще молекулам водной среды на атомарном уровне.

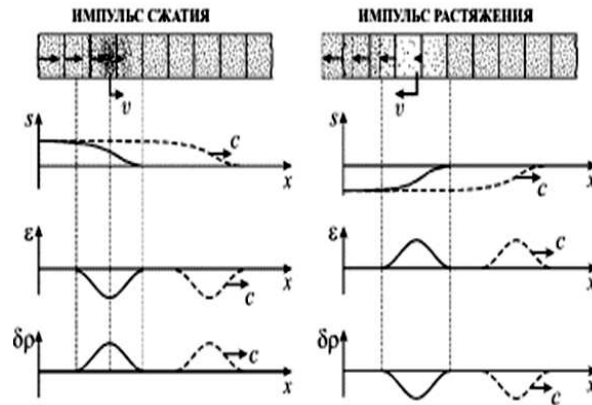


Рис. 3. Продольная волна

Уравнение волны, бегущей вдоль оси Ox , в обоих случаях имеет вид:

$$s(x, t) = s(t - x/c). \quad (3)$$

Деформация водной среды $\varepsilon = \partial s / \partial x$ и колебательная скорость $\nu = \partial s / \partial t$ микрообъема водной среды связаны соотношением $\frac{\partial s}{\partial x} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial s}{\partial t}$, или $\varepsilon = -\frac{\nu}{c}$.

Подчеркнем, что в импульсе сжатия $\varepsilon < 0$ скорость ν совпадает по направлению со скоростью c . В импульсе растяжения они имеют противоположные направления.

Рассчитаем скорость распространения продольных волн. На рис. 3 изображен фрагмент направления распространения акустической энергии и показан его элемент dx , к концам которого приложены нормальные напряжения σ_n . Уравнение движения микрообъема воды с поперечным сечением, равным S имеет вид:

$$dm \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = S[\sigma_n(x + dx, t) - \sigma_n(x, t)], \quad (4)$$

где $dm = \rho_0 S dx$. Чтобы преобразовать (4) к волновому уравнению, необходимо связать напряжение σ_n с деформациями элементов водной среды (рис.4). Проще всего это можно сделать для микрообъема воды с поперечным сечением, равным S .

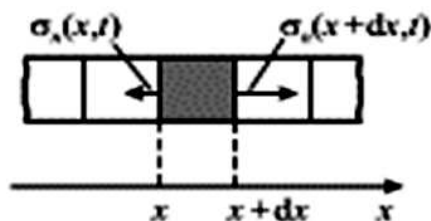


Рис. 4. Связь напряжения σ_n с деформациями элементов водной среды

При повышении частоты (или при понижении температуры) скорость звука в воде действительно постепенно отходит от "нормальной" зависимости и начинает расти (о существовании такого плавного перехода, кстати, мнения ученых тоже разделяются).

Большая сложность проведения эксперимента по проверке явления "быстрого звука" состоит в том, что наиболее четко переход от нормального к быстрому звуку проявляется в очень холодной и даже переохлажденной воде, то есть ниже нуля градусов Цельсия. Эксперименты с переохлажденной водой требуют сноровки, поскольку при малейшем возмущении она быстро кристаллизуется.

Наиболее достоверным экспериментальным направлением обнаружения явления повышенного распространения скорости звука в воде и описания перехода от нормального звука к "быстрому" в гигагерцевом диапазоне на атомарном уровне для воды может быть такая последовательность действий: путем облучения воды потоком нейтронов или рентгеновских лучей, которые, сталкиваясь с молекулами воды, могут породить в ее микроскопическом объеме быстрые колебания и передать им часть их энергии и импульса. Из соотношения этих двух величин можно вывести скорость распространения звуковых колебаний в водной среде. Схематично вышеизложенное для процесса "быстрого звука", его накопления и передачи его энергии водной среде для излучения можно представить в форме виртуального ЭАП (излучателя), (рис.5).

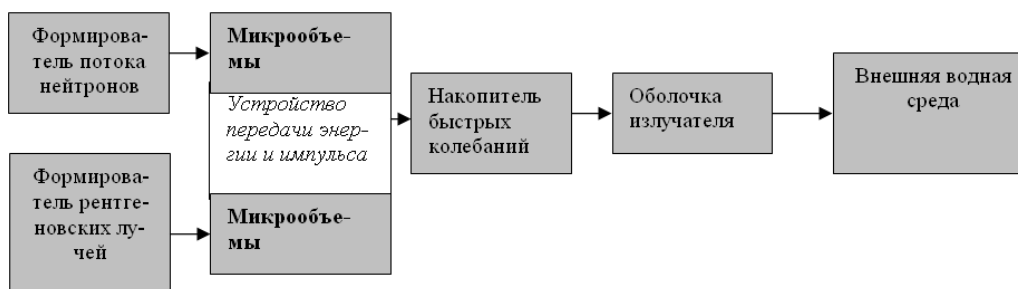


Рис. 5. Схема виртуального ЭАП (излучателя) для пояснения явления "быстрого звука"

Полученные теоретические результаты позволяют оптимистически посмотреть на решение проблем, поясняющих явление "быстрого звука". Создание гигагерцевых ЭАП на базе новой технологии осаждения поликристаллических пленок алмаза из газовой фазы

(Chemical Vapor Deposition, CVD) [8] позволит перенести информационную область обнаружения морских объектов и явлений в ранее не использованную морскими судами часть частотного диапазона.

Список литературы

- [1] S.C.Santucci, D.Fioretto, L.Comez, A.Gessini, C.Masciovecchio, Is there any fast sound in water? *Physical review letters*, **97(22)**(2006), 5701-5704.
- [2] П.А.Стародубцев, Подводная гидроакустика в рыбной отрасли, Владивосток, ТОВМИ имени С.О.Макарова, 2007.
- [3] П.А.Стародубцев, Е.В.Шевченко, Фазовая скорость просветного сигнала и физические основы ее изменения на неоднородностях морской среды и сформированных рыбных косяках, *Успехи рыболовства*, Сб. научных трудов, Владивосток, ДВГТРУ, (2006), Вып. 16, 152-156.
- [4] O.Mishima, E.Stanley, The Relationship between Liquid, Supercooled and Glassy Water, *Nature*, **396**(1998), 329-335.
- [5] Ю.И.Головин, Вода и лед — знаем ли мы о них достаточно? *УСОЖ*, (2000), №9, 66-72.
- [6] И.В.Золотухин, Фракталы в физике твердого тела, *Соросовский Образовательный Журнал*, (1998), №7, 108-113.
- [7] П.А.Стародубцев, Акустическая томография в процессе обнаружения подводных объектов, Владивосток, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 2005.
- [8] О.С.Моряков, Алмазные теплоотводы в конструкции полупроводниковых приборов, *Обзоры по электронной технике, Сер. Полупроводниковые приборы*, М., (1982), Вып.1 (857).

Modern Methods for Transmission of Sound Energy in Water and Their Theoretical Development

Pavel A.Starodubtsev
Roman N.Alifanov
Svetlana V.Gutorova

The paper provides a theoretical basis for modern methods and technologies for sound energy transmission in GHz frequencies. We explain the physical phenomenon of „quick sound“ on the atomic level in the sea water.

Keywords: methods of transfer of the sound information in the water environment, fast sound.