АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2004, том 50, № 4, с. 512–515

УДК 534.26

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА КОСЯКОМ РЫБ, НАХОДЯЩИМСЯ У ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД

© 2004 г. А. А. Клещев

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008 С.-Петербург, ул. Лоцманская, 3
E-mail: gakusei@VG2068.spb.edu

Поступила в редакцию 23.10.2002 г.

Изучается рассеяние звука достаточно разреженным косяком пузырных рыб в свободной среде, у границы раздела сред и в волноводе. Газовый пузырь рыб аппроксимируется вытянутым сфероидом с соотношением полуосей 1 : 10. Вычислены характеристики обратного отражения звука косяком при различных углах облучения, изменяющемся составе рыб в косяке и перемещении рыб с различными скоростями друг относительно друга.

Известно [1], [2], что у пузырных рыб рассеянный ими звуковой сигнал формируется, в основном, за счет отражающих характеристик самого газового пузыря. Очень часто сам газовый пузырь аппроксимируется идеально мягким вытянутым сфероидом [2] соответствующих размеров и отношением полуосей. Как показывают расчеты, мягкие ткани, окружающие пузырь, могут влиять на отраженный сигнал только на достаточно высоких частотах [1], [3].

Особенностью данной работы является то, что в ней изучается рассеяние звука физической моделью достаточно разреженного косяка рыб, т.е. речь идет не об одном, а о нескольких рассеивателях, находящихся вблизи друг друга и границы раздела сред. Как показано в [7], отраженный суммарный сигнал формируется не за счет взаимодействия рассеивателей между собой, а за счет интерференции сигналов, отраженных отдельными рассеивателями, если расстояние между рассеивателями в 3 и более раз превышает размер большего из них. Этот критерий и был выдержан в расчетах. Кроме того, предполагается, что косяк находится вблизи одной из двух границ: вода – воздух, вода – дно. Для упрощения расчетов границы предполагаются плоскими и идеальными, воздух заменяется вакуумом, а дно предполагается идеально твердым. Это позволяет при вычислениях использовать мнимые рассеиватели и мнимые источники [7].

Характеристики рассеяния отдельных особей, аппроксимируемых мягкими вытянутыми сфероидами, вычислялись с помощью рядов по угловым и радиальным сфероидальным функциям [4]–[6]. Использование мнимых источников и рассеивателей позволяет избавиться от границы раздела сред и обратиться к свободной среде, в которой размещены действительные и мнимые источники и рассеиватели.

Источник и приемник представляют собой совмещенную систему, находящуюся в дальней зоне (зоне Фраунгофера) косяка рыб. Поэтому направления из центра всех рассеивателей в центр совмещенной системы источник – приемник параллельны друг другу.

Косяк из шести особей различной длины схематично показан на рис. 1а и 1б: рис. 1а соответствует виду сбоку, рис 1б – виду сверху. На рис. 1в показан косяк из трех рыб, вид сбоку. В соответствии со сказанным выше, в качестве рассеивателей рассматриваются вытянутые сфероиды, имитирующие газовые пузыри рыб.

Несложно показать, что применительно к трем особям суммарное значение угловой характеристики $\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)$в направлении на действительный источник равно:

$$\begin{aligned}\Psi_\Sigma(\theta_0; 0) = {} & \Psi_1(\theta_0; 0)\exp[-2ikl_1\sin\theta_0] + \\ & + \Psi_2(\theta_0; 0)\exp[-2ikl_2\cos(\alpha - \theta_0)] + \\ & + \Psi_3(\theta_0; 0)\exp[-2ikl_3\cos(\beta - \theta_0)] + \\ & + \Psi_1(\theta_0; 0)\exp[2ikl_1\sin\theta_0] + \\ & + \Psi_2(\theta_0; 0)\exp[-2ikl_2\cos(\alpha + \theta_0)] + \\ & + \Psi_3(\theta_0; 0)\exp[-2ikl_3\cos(\beta + \theta_0)] \pm 2\Phi_1(\theta_0, \pi) \pm \\ & \pm 2\Phi_2(\theta_0, \pi)\exp[-2ikl_2\cos\alpha\cos\theta_0] \pm \\ & \pm 2\Phi_3(\theta_0, \pi)\exp[-2ikl_3\cos\beta\cos\theta_0],\end{aligned}$$

где знак "+" относится к условию Неймана (абсолютно твердое дно), знак "–" к условию Дирихле (абсолютно мягкая поверхность); функции $\Psi_1(\theta_0, 0)$, $\Psi_2(\theta_0; 0)$ и $\Psi_3(\theta_0, 0)$ представляют собой угловые характеристики действительных рассеивате-

лей, а $\Phi_1(\theta_0; \pi)$, $\Phi_2(\theta_0; \pi)$ и $\Phi_3(\theta_0; \pi)$ – такие же угловые характеристики мнимых рассеивателей. Углы α и β отсчитываются от границы раздела сред и характеризуют угловое положение центров 2-го и 3-го рассеивателя; углы θ_0 и φ_0 представляют собой сферические полярный и азимутальный углы (с полярной осью X) совмещенной системы, находящейся на расстоянии R в зоне Фраунгофера по отношению к косяку; эти углы θ_0 и φ_0 остаются постоянными и не зависят от Z (даже при перемещении отдельных особей в косяке), поскольку:

1) расстояние R в реальных ситуациях на 3–4 порядка больше размеров косяка и тех перемещений рыб в нем, которые закладываются в расчеты;

2) оси вращения сфериодиов остаются всегда параллельными оси X.

В аналитическом решении R полагается равным ∞, что и обеспечивает плоскую падающую волну на косяк.

Расстояние Z отсчитывается от границы раздела сред, как для действительных, так и для мнимых рассеивателей. Отраженный от косяка сигнал при перемещении рыб в нем зависит от изменения расстояния между отдельными особями (при их движении с различными скоростями) и от изменения расстояний между действительными и мнимыми рассеивателями.

На рис. 2 изображены значения модуля $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ обратного отражения для угла $\theta_0 = 30°$ (в зависимости от Z) для шести (кривая *1*) и трех (кривая *2*) рыб, удаляющихся с одинаковой скоростью от границы раздела вода – абсолютно твердое дно; Z – расстояние в м. по нормали к границе раздела сред.

В косяке из трех особей рыбы имеют волновые размеры C = 100; 65; 15; в косяке из шести рыб одна из них имеет волновой размер C = 100 (самая крупная), две – волновой размер C = 65 и три – волновой размер C = 15. Прямые линии *3* и *4* относятся к скоплению из шести и трех особей, соответственно, в свободной среде. На рис. 3 изображены модули обратного отражения $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ для скопления из трех особей, одна из которых неподвижна (C = 100), а две другие (C = 65 и C = 15) перемещаются вдоль оси Z (граница вода – вакуум) с разными скоростями (кривая *1*). Кривая *2* относится к такому же движению рыб, но в свободной среде.

В связи с тем, что газовый пузырь в 3–4 раза меньше размеров самой рыбы, для самого большого газового пузыря длиной 0.8 м (C = 100.0) минимальное расстояние между отдельными особями возрастало с течением времени.

В отличие от [8], где рассматривается только вертикальное перемещение рыб в косяке относи-

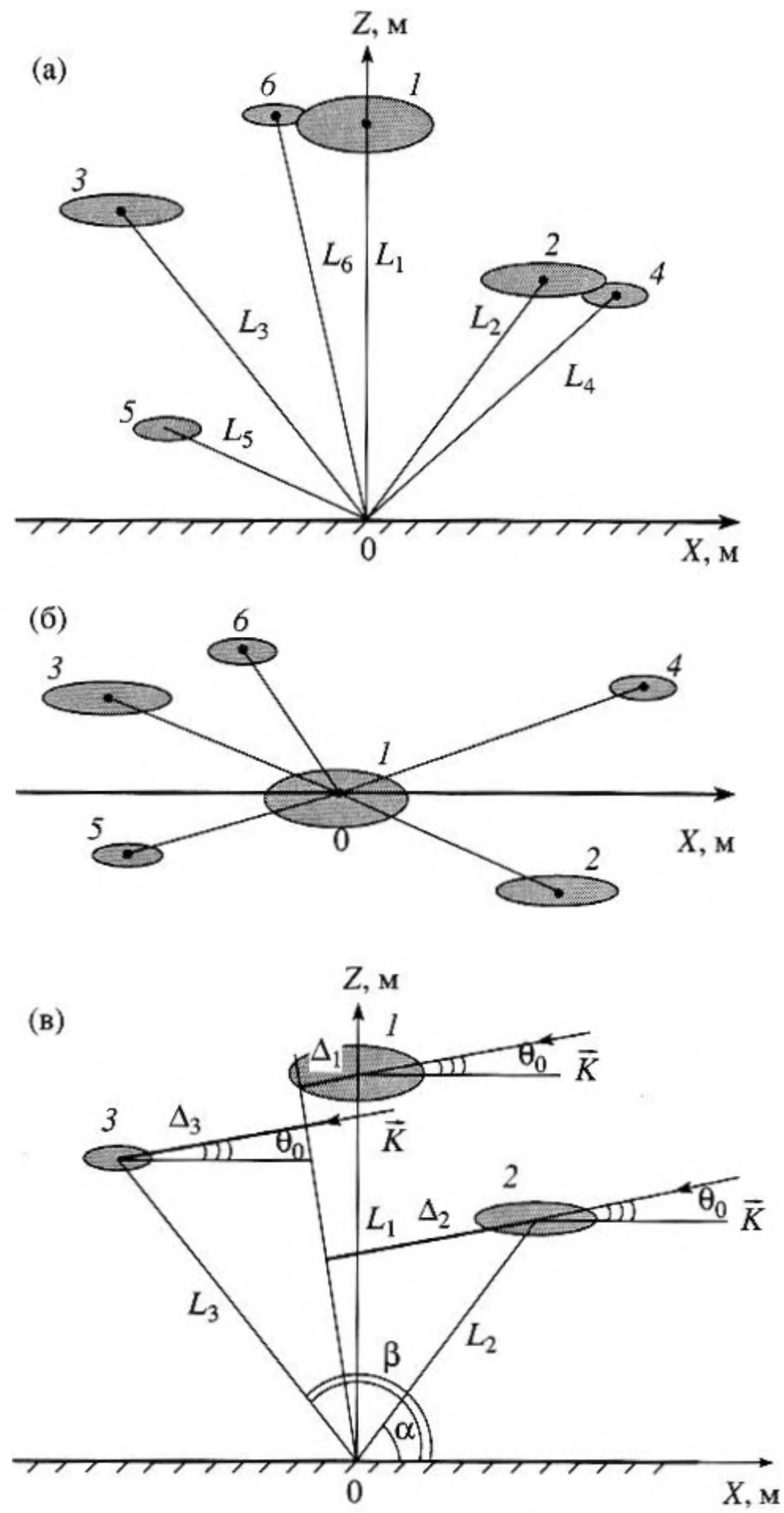

Рис. 1. Схематичное изображение косяка.

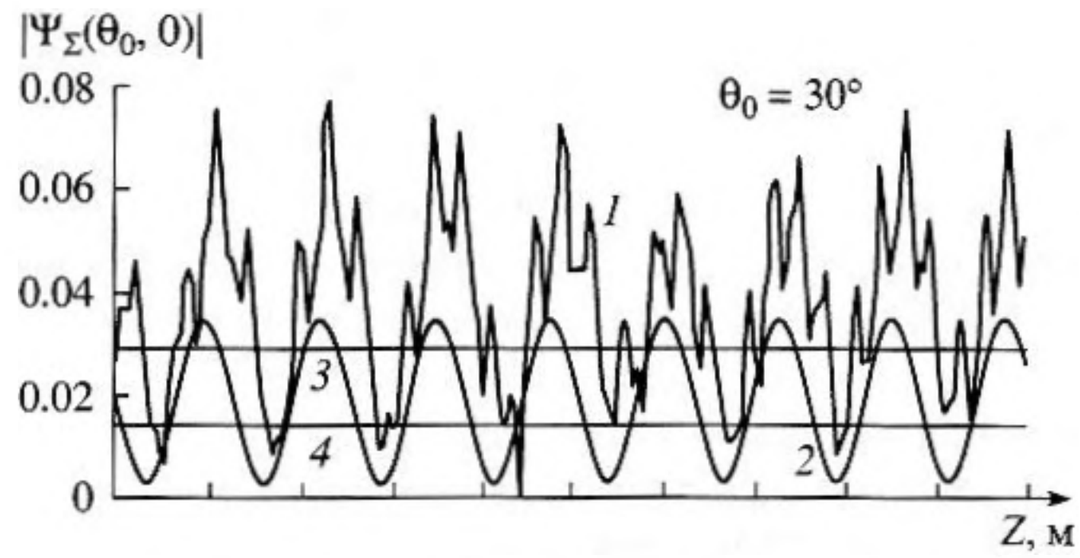

Рис. 2. Модуль обратного отражения $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ для косяков из шести (*1*) и трех (*2*) рыб ($\theta_0 = 30°$) при их вертикальном перемещении.

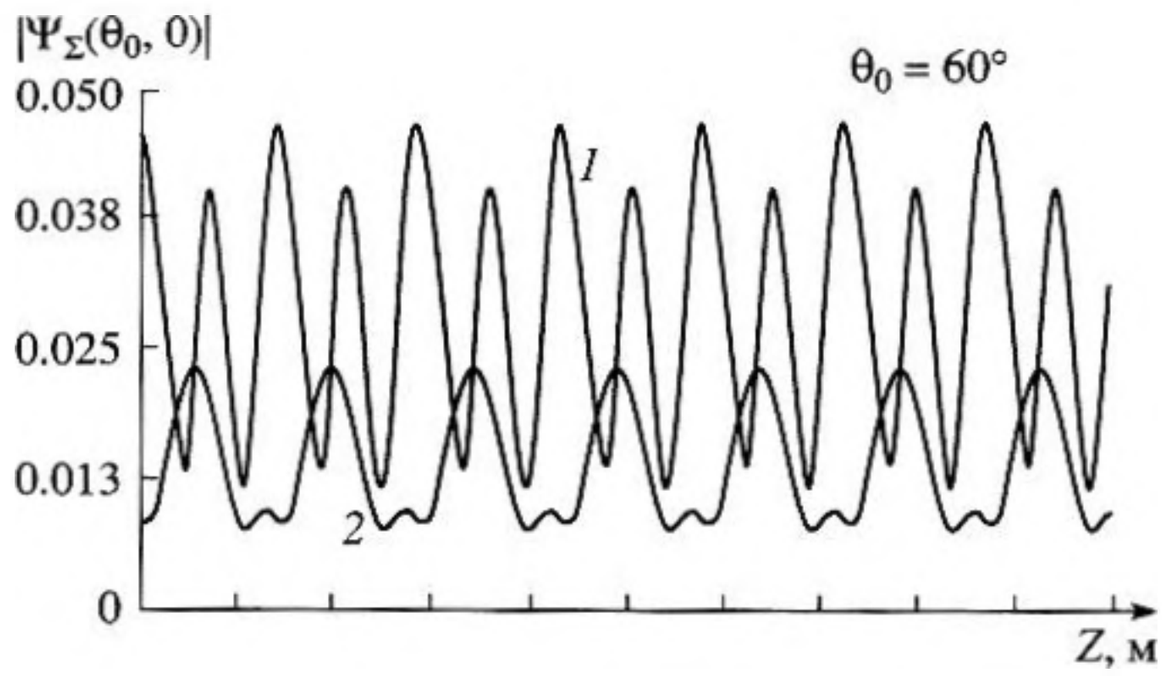

Рис. 3. Модуль обратного отражения $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ для трех рыб ($\theta_0 = 60°$), перемещающихся вдоль оси Z с различными скоростями.

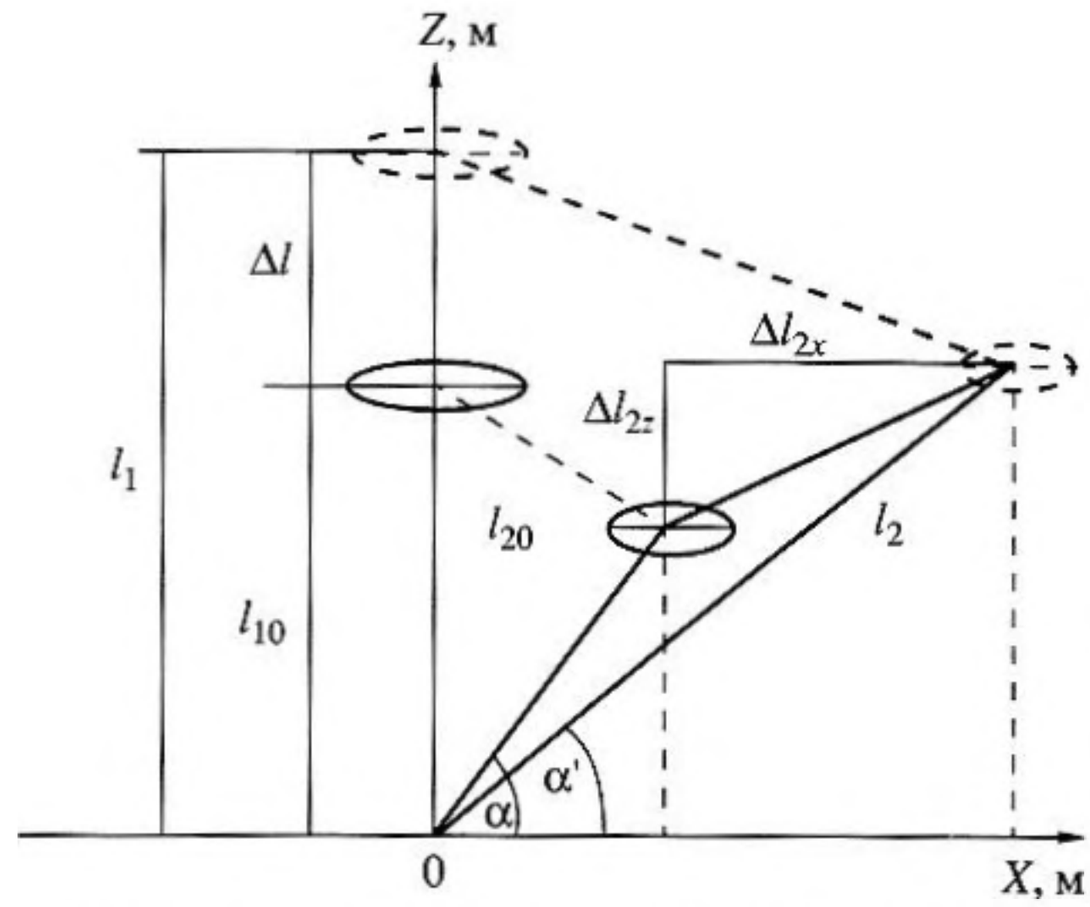

Рис. 4. Схематичное изображение перемещения двух рыб относительно границы вдоль осей X и Z.

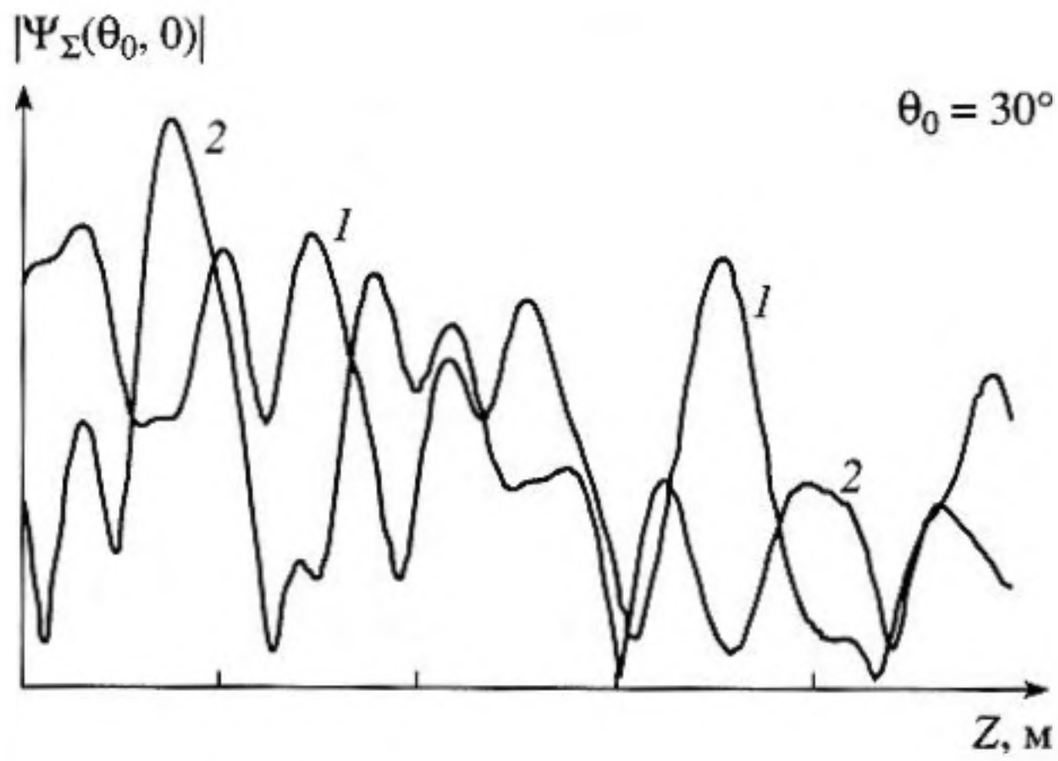

Рис. 5. Модуль обратного отражения $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ ($\theta_0 = 30°$) для косяка из шести рыб, перемещающегося вдоль осей X и Z вблизи абсолютно жесткой (кривая *1*) или абсолютно мягкой (кривая *2*) границ.

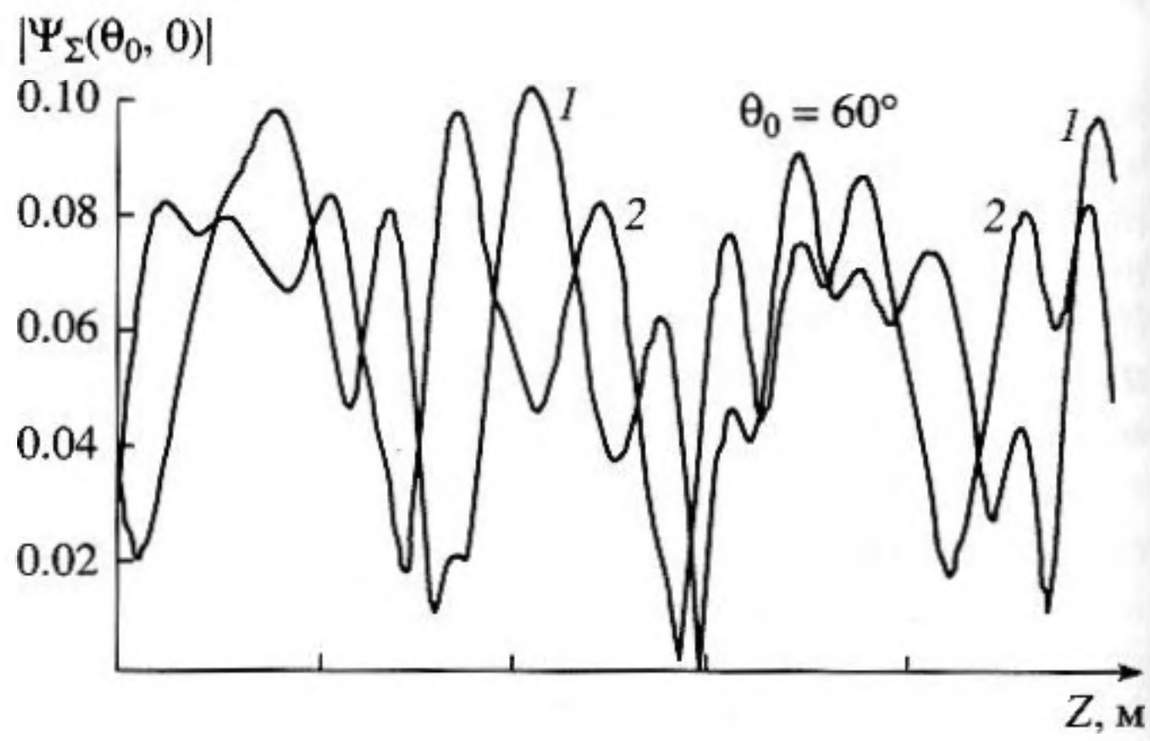

Рис. 6. Модуль обратного отражения $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ ($\theta_0 = 60°$) для косяка из шести рыб, перемещающегося вдоль осей X и Z вблизи абсолютно жесткой (кривая *1*) или абсолютно мягкой (кривая *2*) границ.

тельно друг друга, рассмотрим общий случай, когда имеет место и горизонтальное, в вертикальное смещение особей в косяке. Применительно к двум рыбам геометрия задачи представлена на рис. 4.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: α и α' – начальное и текущее значения угла для центра 2-ой рыбы относительно границы раздела; l_{10} и l_1, l_{20} и l_2 – начальные и текущие значения расстояний от начала координат O до центра 1-ой и 2-ой рыб соответственно; Δl_{2x} и Δl_{2z} – текущие перемещения вдоль осей X и Z 2-ой рыбы относительно ее начального положения; Δl – текущее вертикальное перемещение 1-ой рыбы. Углы α и β связаны с координатой z зависимостью: $z_2 = l_{20}\sin\alpha$; $z_3 = l_{30}\sin\beta$, где l_{30} – начальное расстояние от центра третьей рыбы до начала координат O.

Модули обратного отражения $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ при таком движении рыб для косяков из шести рыб, находящихся вблизи абсолютно жесткой (кривая *1*) или абсолютно мягкой (кривая *2*) сред, видны из рис. 5 ($\theta_0 = 30°$) и рис. 6 ($\theta_0 = 60°$).

Анализ выполненных расчетов показывает, что:

1) модуль обратного отражения $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ при вертикальном перемещении вдоль оси Z (горизонтальное перемещение вдоль оси X отсутствует) меняется по периодическому закону при одинаковых и различных скоростях движения отдельных особей в косяке;

2) при одновременном движении по вертикали (вдоль оси Z) и по горизонтали (вдоль оси X) периодический характер изменения $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ исчезает;

3) значение $|\Psi_\Sigma(\theta_0; 0)|$ мало зависит от вида идеальной границы (абсолютно мягкая или абсолютно жесткая);

4) косяк рыб, находящийся вблизи границы жидкость–идеальная среда, дает больший (в среднем по Z) отраженный сигнал в направлении на источник по сравнению со свободной средой за счет переотражения звука границей раздела; в реальных условиях это превышение будет нивелировано тем, что (реальная) граница не является ровной и гладкой, а нижняя граница (дно) далеко не идеально твердая;

5) принятые в расчетах косые углы облучения ($\theta_0 = 30°$ и $\theta_0 = 60°$) представляют наибольший практический интерес, так как при нормальном падении волны на границу ($\theta_0 = 90°$) отражение звука косяком маскируется большим отраженным сигналом от границы и селекция полезного сигнала (от косяка рыб) на фоне границы возможна не всегда даже при использовании импульсных сигналов, модулированных по амплитуде или частоте.

При учете влияния тканей и костей рыб на отраженный сигнал физическая модель каждой особи в отдельности становится сложнее, но и в этом случае задача вполне разрешима [3, 9, 10].

Автор благодарит Давыдову О.Л. и Шкитину Ю.Ю. за помощь в проведении расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева И.Б., Самовольдкин В.Г.* Рассеяние акустических волн на морских организмах. М.: Агропромиздат, 1986. С. 104.
2. *Вестон Д.* Распространение звука в присутствии пузырных рыб. Подводная акустика. Т. 2. Мир, 1970. С. 87–130.
3. *Клещев А.А., Ростовцев Д.М.* Рассеяние звука упругой и жидкой эллипсоидными оболочками вращения // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 5. С. 691–694.
4. *Клещев А.А., Шейба Л.С.* Рассеяние звуковой волны идеальными вытянутыми сфероидами // Акуст. журн. 1970. Т. 16. № 2. С. 264–268.
5. *Клещев А.А., Клюкин И. И.* Основы гидроакустики. Л.: Судостроение. 1987. 224 с.
6. *Клещев А.А.* Гидроакустические рассеиватели. СПб.: Судостроение. 1992. 248 с.
7. *Клещев А.А.* Рассеяние звука сфероидальным телом, находящимся у границы раздела сред // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 1. С. 143–145.
8. *Клещев А.А.* Физическая модель отражения звука косяком рыб с учетом его динамических характеристик. Сб. трудов XII сессии РАО. 2002. Т. 1.-М.: ГЕОС. С. 225–228.
9. *Белькович В.М., Григорьев В.А., Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* О возможностях использования акустической дифракции в задачах мониторинга китообразных // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 2. С. 162–166.
10. *Шендеров Е.Л.* Дифракция звука на упругой или импедансной сфере, расположенной вблизи импедансной или упругой границы полупространства // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 5. С. 684–694.

Physical Model of Sound Scattering by a School of Fishes Located near an Interface

A. A. Kleshchev

Sound scattering by a fairly sparse school of bladder fishes in a free medium, near an interface, and in a waveguide is studied. The air bladder of a fish is approximated by a prolate spheroid with an axial ratio of 1 : 10. Characteristics of the back reflection of sound by a school of fishes are calculated for various angles of irradiation, variable number of fishes in the school, and various velocities of fishes with respect to each other.