громоздкости оно здесь не приводится). По полученной для W формуле были выполнены численные расчеты для пьезокерамического цилиндрического преобразователя, нагруженного на водную среду через два переходных слоя. В качестве материала преобразователя рассматривалась керамика ТБК-3, материала наружного слоя – сталь, материала промежуточного слоя – эпоксидный клей с волновым сопротивлением $\rho c=2{,}78\cdot10^5$ *г/см²сек* и плотностью $\rho=1{,}26$ *г/см³* или вода.

При расчетах варьировались толщины переходных слоев, в результате чего были найдены их значения, обеспечивающие наиболее широкополосные частотные характеристики для каждой из комбинаций материалов слоев. На фиг. 1 представлены такие частотные характеристики мощности излучения при относительной толщине стенки пьезокерамического цилиндра $(r_3-r_4)/r_4=0{,}14$, а на фиг. 2 – при $(r_3-r_4)/r_4=0{,}3$. Нормировочная постоянная $W_0=e_{33}{}^2U_m/2z_4r_4$, где e_{33} – пьезоконстанта, U_m – амплитуда электрического напряжения, z_4 – волновое сопротивление пьезокерамики, $x_4=k_4r_4$; k_4 – волновое число для пьезокерамики.

Как видно из фиг. 1, преобразователь с $(r_3-r_4)/r_4=0{,}14$ без переходных слоев обладает относительной полосой пропускания 48%. Применение двух переходных слоев позволяет увеличить полосу пропускания до 112% в случае промежуточного слоя из клея и до 80% в случае промежуточного слоя из воды. Относительные толщины слоев в первом случае составляли $(r_2-r_3)/r_4=0{,}6$; $(r_1-r_2)/r_4=0{,}005$, а во втором – $(r_2-r_3)/r_4=0{,}2$; $(r_1-r_2)/r_4=0{,}06$.

Для преобразователя с $(r_3-r_4)/r_4=0{,}3$ соответствующие величины относительной полосы пропускания составляют: 26, 107 и 60%, а относительные толщины слоев соответственно равны $(r_2-r_3)/r_4=0{,}5$; $(r_1-r_2)/r_4=0{,}035$ и $(r_2-r_3)/r_4=0{,}18$; $(r_1-r_2)/r_4=0{,}1$.

На основании проведенных вычислений можно сделать следующие выводы.

Бóльшую полосу пропускания обеспечивает промежуточный слой из эпоксидного клея. Однако толщина его довольно велика. Волновая толщина клея на частоте радиального резонанса пьезокерамического цилиндра составляет 0,19 для случая фиг. 1 и 0,15 – для случая фиг. 2. Это говорит о том, что эпоксидный клей для указанных толщин стенок пьезокерамического цилиндра является материалом с акустическими параметрами, близкими к оптимальным при согласовании с помощью одного переходного слоя [1].

В случае промежуточного слоя из воды достигается меньшая полоса пропускания при меньших радиальных размерах и незначительном снижении мощности излучения. Выигрыш в радиальных размерах можно охарактеризовать следующими цифрами. При $(r_3-r_4)/r_4=0{,}14$ величина r_1/r_3 составляет 1,23 для слоя из воды и 1,53 – для слоя из эпоксидного клея, а при $(r_3-r_4)/r_4=0{,}3$ эта величина равна соответственно 1,21 и 1,41.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Д. Б. Дианов, А. Г. Кузьменко.* Исследование возможностей расширения полосы пропускания цилиндрических пьезокерамических преобразователей. Акуст. ж., 1970, *16*, 2, 236—240.
2. *В. Б. Аранович, И. А. Прудов.* О резонансном согласовании в тонких переходных слоях. Акуст. ж., 1971, *17*, 4, 513—520.

Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступила 15 июля 1974 г.

УДК 534.88

ЭХО-ЛОКАЦИОННОЕ РАЗЛИЧЕНИЕ ДЕЛЬФИНОМ АФАЛИНОЙ ШАРОВЫХ МИШЕНЕЙ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ ОДНОВРЕМЕННО РАЗМЕРАМИ И МАТЕРИАЛОМ

Н. А. Дубровский, А. А. Титов

В наших работах [1–3] была предложена модель механизма эхо-локационного различения шаровых мишеней. В соответствии с этой моделью две шаровые мишени различались более чем в 75% случаев, если для разности средних периодов осцилляций в спектрах эхо-сигналов от сравниваемых мишеней выполнялось условие

$$|\delta f|=\left|\frac{c}{2\pi}\left(\frac{\Delta_1}{a_1}-\frac{\Delta_2}{a_2}\right)\right|>\delta f_0, \tag{1}$$

где c – скорость звука в воде, a_1 и a_2 – радиусы сравниваемых мишеней, Δ_1 и Δ_2 – средние периоды осцилляций в спектре эхо-сигнала, выраженные в единицах безразмерной частоты ka (где k – волновое число), δf_0 – некоторая пороговая величина, зависящая от индивидуальных особенностей животных. Проведенные ранее эксперименты [1–6] относились к частному случаю различения шаровых мишеней одинакового размера, но отличающихся материлом ($a_1=a_2$ и $\Delta_1\neq\Delta_2$), либо к случаю различения по размерам мишеней, изготовленных из одного и того же материала ($a_1\neq a_2$ и $\Delta_1=\Delta_2$).

С целью проверки предсказаний модели для общего случая, когда $a_1\neq a_2$ и $\Delta_1\neq\Delta_2$, были проведены эксперименты по эхо-локационному различению латунных и дюралевых шаров. В каждом опыте дельфину предъявлялись для различения пары шаров, состоящие из латунного шара одного из стандартных диаметров (40, 44, 46, 48, 50, 52 и 54 *мм*) и дюралевого шара из набора диаметров 50, 55, 60, 64, 68, 72, 75, 78 и 80 *мм*. Значения Δ для латуни, равное 1,7, и дюраля, равное 2,5, были измерены в работе [7]. Опыты проводились в бассейне размерами 19×13×3 *м* по методике двигательных рефлексов с пищевой мотивацией. Мишени располагались по обе стороны разделительной сети длиной в среднем 7 *м*. При помощи этой сети задавалась дальность различения мишеней. Подробно данная методика описана ранее [1]. Эксперименты были выполнены на дельфине «Гемма», возраст которой оценен нами в 15–20 лет. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Данные по различению латунных и дюралевых шаров

δf, *кГц*	8,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
ε_1, %	100	100	92	93	94	95	100	92	82	91	80	60	65
σ_1, %	—	—	8	5	5	5	—	5	10	10	10	—	10
n_1	5	10	12	14	16	20	8	37	33	43	20	20	31
ε_2, %	95	—	—	—	95	92	100	95	84	94	95	90	91
σ_2, %	5	—	—	—	5	5	—	5	14	7	6	7	13
n_2	21	—	—	—	38	27	12	55	60	66	50	58	35
δf, *кГц*	0,5	0,0	–0,5	–1,0	–1,5	–2,0	–2,5	–3,0	–3,5	–4,0	–4,5	–5,0	–5,5
ε_1, %	64	59	70	50	59	51	68	75	—	90	100	100	100
σ_1, %	9	12	5	—	11	1	12	5	—	—	—	—	—
n_1	47	29	70	20	29	36	20	20	—	10	8	8	9
ε_2, %	83	78	84	83	93	87	—	87	95	100	—	90	100
σ_2, %	15	14	13	19	9	31	—	11	5	—	—	—	—
n_2	188	159	148	95	30	106	—	77	20	21	—	10	4

Значения δf, приведенные в таблице, вычислялись по формуле (1), с округлением до ближайших целых или полуцелых чисел, ε_1 и ε_2 – значения процента правильного различения мишеней, полученные при начальных и повторных предъявлениях одного из стандартных латунных шаров и полного набора дюралевых, σ_1 и σ_2, n_1 и n_2 – стандартные отклонения и числа испытаний (подходов дельфина к мишени) для начальных и повторных предъявлений мишеней.

Рассмотрим сначала результаты, относящиеся к начальным предъявлениям мишеней. Под начальными предъявлениями мы будем понимать такие предъявления данной стандартной мишени из латуни и набора дюралевых мишеней, которые предлагались животному либо вообще впервые, либо после некоторого перерыва, в течение которого животное участвовало в опытах с другими стандартными мишенями из латуни, либо в измененных (как правило, более трудных) условиях, например при увеличении длины разделительной сети. Для этого длина разделительной сети могла изменяться от 5 до 9 *м*.

Как видно из таблицы, процент различения ε_1 принимает значения вблизи 90÷÷100%, когда $\delta f>2$ *кГц* и $\delta f<-3$ *кГц*. Внутри интервала $+2$ *кГц*$<\delta f<-3$ *кГц* величина ε_1 лежит в пределах от 55 до 65%. Эти данные находятся в хорошем соответствии с предсказаниями нашей модели (неравенство (1)). Ранее отмечалось [2, 3], что разность средних периодов осцилляций в спектрах эхо-сигнала является признаком первого приближения и что животные при повторных предъявлениях находят дополнительные признаки, позволяющие им повышать процент различения мишеней, для которых выполняется условие (1). Подобное явление наблюдалось и в данном опыте, что хорошо заметно по результатам повторных предъявлений.

При повторных предъявлениях мишеней процент их различения (см. таблицу) быстро возрастал, достигая значений, близких к 80÷100% внутри интервала 2 *кГц*$>$ $>\delta f>-3$ *кГц*.

Известно [8], что переход от одного признака различения (или обнаружения) к другому сопровождается повышением дисперсии опытных данных. Как явствует из таблицы, стандартные отклонения как для начальных (σ_1), так и для повторных (σ_2) измерений, значительно больше в интервале $|\delta f|<2{,}5$ *кГц*, чем вне его.

Отметим, что применимость нашей модели для предсказания результатов, экспериментов по различению шаровых мишеней, отличающихся одновременно размерами и материалом, была показана в работе [9] на одном частном случае (пара шаров из латуни и алюминия с диаметрами 50 и 70 *мм*). Этой паре по нашим оценкам соответствует величина $\delta f\approx 0{,}7$ *кГц*. Процент различения указанной пары мишеней составил 57.

В работе [9] рассматриваемая модель описана на временно́м языке. Предполагается, что признаком различения мишеней служит разность временны́х интервалов между первичным и вторичным эхом ($\delta\tau$). Легко показать, однако, что этот признак различения эквивалентен в рассматриваемом приближении спектральному признаку — разности средних периодов осцилляций в спектре эхо-сигналов от мишеней δf [10]. Связь величин $\delta\tau$ и δf дается выражением $\delta f=\delta\tau/\Delta t_1\Delta t_2$, где Δt_1 и Δt_2 — интервалы времени между первичным и вторичным эхом для различаемых мишеней, а $\delta\tau=\Delta t_1-\Delta t_2$.

Таким образом, доказана применимость разработанной нами ранее модели механизма эхо-локационного распознавания для шаровых мишеней, отличающихся одновременно по размеру и материалу. Подтверждено, что признак различения, определяемый как разность средних периодов осцилляций в спектрах эхо-сигналов, является признаком первого приближения, который дельфин использует в первую очередь, однако в ситуациях, когда этот признак не позволяет различить мишени, дельфины находят дополнительные признаки. Дополнительные признаки обсуждались нами в работах [1, 3, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Н. А. Дубровский, А. А. Титов, П. С. Краснов, В. П. Бабкин, В. М. Лекомцев, Г. В. Николенко.* Исследование разрешающей способности эхо-локационного аппарата черноморской афалины. Тр. Акуст. ин-та, 1970, вып. X, 163—181.
2. *N. A. Dubrovsky, P. S. Krasnov, A. A. Titov.* Discrimination of solid elastic spheres by an echolocating porpoise Tursiops truncatus. VII Intern. Congr. Acoust., Budapest, 1971, 25H3.
3. *Н. А. Дубровский, П. С. Краснов.* Распознавание дельфином афалиной упругих шаров по материалу и размеру. Тр. Акуст. ин-та, 1971, вып. XVII, 8—18.
4. *В. П. Бабкин, Н. А. Дубровский, П. С. Краснов, А. А. Титов.* Различение материалов шаровых мишеней дельфином афалиной. Тез. докл. VII Всес. акуст. конф. Л., ЦНИИТЭИС, 1971, 5.
5. *А. Л. Абрамов А. Р. Жежерин, В. И. Королев, Ю. А. Малышев.* Исследование возможностей дельфинов Tursiops truncatus различать объемные предметы, изготовленные из различных материалов. Тез. докл. XXIII Научн.-техн. конф. ЛИАП., Л., 1970, 63.
6. *K. S. Norris, W. E. Evans, R. N. Turner.* Echolocation in an atlantic bottlenose porpoise during discrimination. Animal sonar systems, 1967, *1*, 409—437.
7. *В. П. Бабкин, Л. М. Фадеева.* Модельные эксперименты по аттестации шаровых мишеней. Тр. Акуст. ин-та, 1971, вып. XVII, 80—98.
8. *Н. А. Дубровский, Л. Н. Тумаркина.* Исследование восприятия человеком амплитудно-модулированных шумов. Акуст. ж., 1967, *13*, 1, 51—59.
9. *А. Г. Голубков, И. В. Ершова, А. Р. Жежерин, В. Б. Фрадкин.* Экспериментальное исследование предельной возможности различения морскими животными шаров. IV Всес. конф. по бионике. М., «Наука», 1973, 27—28.
10. *Н. А. Дубровский, Л. М. Фадеева.* Распознавание шаровых мишеней дельфинами. IV Всес. конф. по бионике. М., «Наука», 1973, 29—34.

Акустический институт
Академии наук СССР
Институт биологии южных морей
Академии наук УССР
Карадагское отделение

Поступила
8 апреля 1974 г.