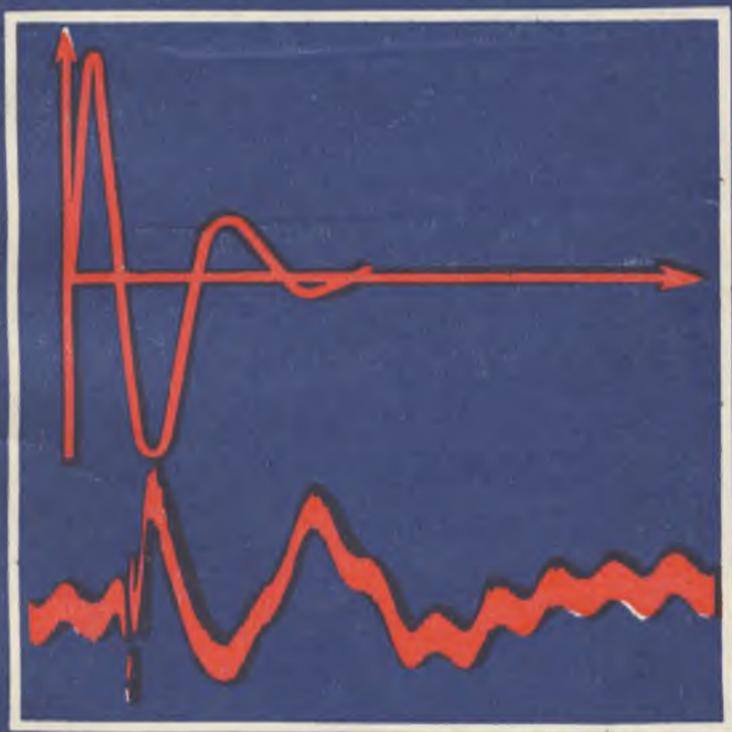


Е. В. РОМАНЕНКО

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОАКУСТИКИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО • НАУКА •

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНСТИТУТ ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОРФОЛОГИИ
И ЭКОЛОГИИ ЖИВОТНЫХ им. А. Н. СЕВЕРЦОВА

Е. В. РОМАНЕНКО

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОАКУСТИКИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1974

УДК 551.463.2

Романенко Е. В. **Физические основы биоакустики.** М., «Наука», стр. 1—178.

В книге рассмотрены основные особенности распространения звуковых волн применительно к биоакустическим исследованиям. Описаны конструкции излучателей и приемников звука, методы регистрации и анализа биоакустической информации. Приведены результаты оригинальных исследований акустики дельфинов и рыб.

Книга предназначена для биологов и инженеров, работающих в области биоакустики.

Рис. 102. Табл. 10. Библ. 146 назв.

Ответственный редактор
член-корр. АН СССР В. Е. СОКОЛОВ

Р $\frac{2-10-04-0482}{055(02)-74}$ 953—74

© Издательство «Наука», 1974 г.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие естественных наук идет по пути все большей специализации. Из многих стабильных областей науки формируются более специализированные направления. Так, из акустики выделилась в самостоятельную область биоакустика.

Биоакустика — это наука о звуках мира животных. Звуки в мире животных чрезвычайно разнообразны и значение их очень многогранно. Слух, наряду со зрением и другими рецепторами, позволяет животным получать сведения об окружающем их пространстве и является в связи с этим одним из средств связи животных с окружающим миром.

Поведение животных — одно из наиболее изменчивых свойств вида. Оно представляет собой сложное переплетение врожденных и приобретенных компонентов. Изучение закономерностей поведения животных во многом опирается на биоакустику. Это особенно характерно для водных животных, у которых возможности зрения более ограничены, чем у наземных, и для которых роль звука увеличивается.

Специальные практические вопросы перед биоакустикой поставлены бионикой. История биоакустики едва ли насчитывает больше трех десятилетий, однако огромный интерес к проблеме и совершенные физические методы исследования позволили накопить большой и разносторонний материал.

По некоторым причинам биоакустику удобно подразделить на две части: биоакустику наземных животных и человека (беспозвоночные, птицы, млекопитающие и человек) и водную биоакустику (беспозвоночные, рыбы, млекопитающие). Каждая из областей биоакустики имеет свои особенности, обусловленные средой обитания (воздух или вода), и свои перспективы развития.

Изучение биоакустики наземных животных должно развиваться в интересах сельского хозяйства (насекомые, грызуны), промышленности и различных видов транспорта (жучки, разрушающие древесину, птицы, летучие мыши).

Успехи в развитии водной биоакустики позволяют познать биомассу пресноводных водоемов, океанов и морей, главным образом ее распределение и поведение, помогут решить проблему поиска новых источников питания человечества. По словам Та-

волги, биоакустика — это «мост между фундаментальными исследованиями и прикладной информацией».

Наибольший интерес в связи с этим приобретает акустика рыб, китообразных, ластоногих и других водных животных. Прежде всего, интересны механизмы излучения и приема сигналов, распознавания звуковых образов, коммуникации и помехоустойчивости.

Наибольшие успехи к настоящему времени достигнуты в исследовании акустики рыб. Изучены не только физические характеристики звуков многих видов рыб, но и их сигнальное значение, что чрезвычайно важно при решении задач управления поведением рыб и организации рационального ведения рыбного хозяйства.

Менее значительны успехи в исследовании акустики китообразных. Не до конца ясен механизм излучения звука дельфинами, в частности локализация излучателей. По вопросу о механизме приема звука китообразными существует ряд гипотез (гипотезы Норриса, Дреера, Резникова), одни более вероятны, другие — менее, но ни одна пока еще не может считаться достоверной. Очень интересным и актуальным является вопрос о распознавании дельфинами звуковых образов. В этом направлении в последнее время предложены интересные гипотезы (Norris *а. оth.*, 1966) и получены ценные результаты (Дубровский и др., 1970), которые пока еще не решают проблемы, но указывают перспективные пути исследования. Важный интерес представляет изучение коммуникационных звуковых сигналов китообразных и вообще их способность к обмену информацией, особенно изучение помехоустойчивости канала связи китообразных.

Те же проблемы, но еще менее изученные, связаны с ластоногими.

Биоакустические исследования невозможны без соответствующей аппаратуры, построенной с учетом самых современных достижений электроники и автоматики. Отсюда необходимость тесного сотрудничества биологов, инженеров, физиков. В связи с этим полезно напомнить, что приоритет в области биоакустических исследований принадлежит биологам. И это естественно, ибо живая природа — это сфера деятельности, прежде всего, биологов. Однако акустика — это сфера деятельности физиков, и достаточно глубокие знания в этой области, так необходимые при биоакустических исследованиях, при современной системе обучения в высших учебных заведениях получают только физики и инженеры тех вузов, где есть кафедры акустики. А это значит, что не каждый инженер может оказаться надежным помощником биологу в биоакустических исследованиях, а только тот, который располагает необходимыми знаниями. В настоящее время не существует учебника по биоакустике, который позволил бы биологам и инженерам углубить свои знания в области акустики и акустических измерений.

Предлагаемая книга представляет собой попытку систематического изложения необходимых биоакустикам сведений по некоторым вопросам акустики, акустических измерений, анализа акустической информации и методов биоакустических исследований. Книга также содержит результаты оригинальных исследований автора. Многие из описанных в книге приборов и методов исследования являются разработками автора. Книга состоит из семи глав.

В первой главе изложены основы биоакустики и некоторые особенности распространения звуковых волн, т. е. дан необходимый минимум сведений по акустике, которым должен обладать каждый, кто занимается биоакустикой.

Во второй главе описаны конструкции излучателей и приемников, одни из которых уже нашли применение в биоакустике, а другие являются перспективными.

В третьей главе приведены различные методы градуировки микрофонов и гидрофонов.

В четвертой главе описаны различные методы и приборы для регистрации и анализа биоакустической информации. Описан также магнитофон для подводной записи и результаты его применения при исследовании биоакустики дельфинов. Здесь же даны элементы теории вероятностей применительно к элементарным оценкам ошибок измерений.

В пятой главе освещено состояние и перспективы применения телеметрической техники в биоакустике, описано разработанное двухканальное телеметрическое устройство для изучения акустики дельфинов и ластоногих. Приведены результаты исследований.

В шестой главе рассматривается очень важный для биоакустики вопрос о моделировании как методе исследования. Здесь же изложены результаты некоторых модельных исследований.

В седьмой главе кратко изложены оригинальные биоакустические исследования. В частности, предложены и проанализированы математические модели излучения дельфинами и рыбами звуковых сигналов. Полученные при этом выводы сопоставлены с результатами собственных экспериментов и литературными данными.

В процессе работы над книгой автор пользовался советами и помощью большого коллектива сотрудников Института эволюционной морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова АН СССР, МГУ и Акустического института, за что приносит им искреннюю благодарность. Особенно автор благодарит докторов биологических наук В. Р. Протасова, Б. М. Мамаева, Б. В. Кошелева, профессора В. Д. Ильичева, кандидата биологических наук В. М. Горбунова, профессора М. А. Исаковича, кандидата физико-математических наук А. А. Чабана, кандидата технических наук М. К. Чернышева и всех сотрудников лаборатории биоакустики ИЭМЭЖ.

ЗВУК И ОСОБЕННОСТИ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Биоакустические исследования практически всегда проводятся в ограниченном пространстве. Даже при наиболее благоприятных условиях, которые имеет исследователь при изучении звуков птиц в поле, звук распространяется в полупространстве, ограниченном поверхностью земли. При изучении звуков рыб в естественных водоемах (реках, озерах, морях) условия значительно сложнее. В этом случае распространение звука ограничено дном, поверхностью воды, берегами и т. п. Еще сложнее условия изучения звуков животных в аквариумах и бассейнах.

Именно поэтому представляется совершенно необходимым рассмотреть наиболее типичные случаи распространения звука и характерные для них закономерности. Основная цель такого рассмотрения состоит не в том, чтобы дать точные расчеты звуковых полей в сложных условиях, а в том, чтобы дать общие представления о возможных искажениях звукового сигнала, распространяющегося в тех или иных условиях.

Рассмотрим следующие случаи распространения звука:

- над поверхностью земли (или воды)
- в помещении (бассейне)
- в мелкой воде
- переход звука из воздуха в воду и обратно
- искажение звукового поля в присутствии человека-оператора.

Однако прежде чем перейти непосредственно к перечисленным вопросам, введем понятие о звуковых волнах, характеризующих их параметры и явления, сопровождающих распространение звука.

1. Звуковые волны

Процесс распространения упругого колебания в среде называется звуковой волной. В этом кратком определении отражена физическая сущность звука. Прежде всего, звук — это колебание частиц упругой среды. Упругие свойства среды обусловлены взаимодействием молекул среды между собой. Каждая молекула среды упрощенно может быть представлена в виде тяжелого шарика, соединенного пружинками с ближайшими соседними молекулами — шариками. Если такой шарик вывести из положения рав-

новесия, то он натянет одни пружинки и сожмет другие. Растянутые пружинки потянут за собой другие молекулы — шарики, а сжатые будут отталкивать. Таким образом, смещение из состояния равновесия одной молекулы повлечет за собой смещение других молекул, связанных с первой молекулой упругими связями. Если теперь молекулу вывести из положения равновесия и отпустить, то она будет колебаться относительно положения равновесия. Начнут колебаться и соседние молекулы по причинам, объясненным выше. Так возникают упругие колебания.

Упругие колебания не могут оставаться в одном месте среды, локализоваться в пределах ближайшего окружения одной молекулы. Неотъемлемым свойством упругих колебаний является их распространение в среде с определенной скоростью, зависящей от упругих свойств среды. Появляются звуковые волны.

Рассмотрим основные свойства звуковых волн на примере гармонических волн, в которых молекулы совершают колебания относительно положения равновесия по закону:

$$a = a_0 \cos \omega t. \quad (1)$$

Здесь a_0 — амплитуда колебаний; ω — круговая частота, равная $2\pi f$; f — частота колебаний (в гц). В формуле (1) a представляет собой расстояние колеблющейся молекулы от положения равновесия в момент времени t . Чаще величину a называют смещением частицы среды в звуковой волне.

Представим себе, что молекула, совершающая колебания по закону (1), расположена в начале координат на рис. 1. Колебательный процесс распространяется вправо от точки O . Возьмем

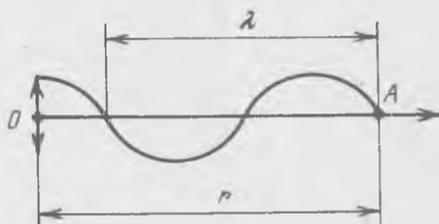


Рис. 1. Распространение колебательного процесса

на пути распространения волны произвольную точку A , лежащую на расстоянии r от начала координат. Колебания, начавшиеся в точке O в некоторый момент времени, дойдут до точки A через промежуток времени

$$\tau = \frac{r}{c}, \quad (2)$$

где c — скорость распространения волны.

Таким образом, точка A начнет колебаться на время τ позже точки O . Считая, что волны, распространяющиеся вдоль рассматриваемой прямой, не затухают, мы получим, что точка A ,

когда дойдет до нее волна, начнет колебаться с амплитудой a и круговой частотой ω , т. е. ее смещение из положения равновесия запишется в виде формулы

$$a = a_0 \cos \omega t', \quad (3)$$

где t' — время, отсчитанное от того момента, когда точка A начала колебаться. Но, так как точка A начала колебаться на промежуток времени τ позже точки O , то $t' = t - \tau$. Подставляя это значение в формулу (3), получаем:

$$a = a_0 \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right), \quad (4)$$

Это соотношение представляет собой уравнение плоской волны, распространяющейся вдоль направления r со скоростью c . Соотношение (4) можно записать в виде

$$a = a_0 \cos \left(\omega t - \frac{\omega r}{c} \right). \quad (5)$$

Величина $\omega r/c$ носит название начальной фазы колебания в данной точке, определяемой расстоянием r от начала координат.

Расстояние между двумя точками, имеющими одинаковую фазу колебаний, называется длиной волны и обозначается через λ .

Плоская звуковая волна характеризуется не только колебательным смещением, но еще и колебательной скоростью

$$\dot{a} = \omega a_0 \sin \left(\omega t - \frac{\omega r}{c} \right), \quad (6)$$

колебательным ускорением

$$\ddot{a} = \omega^2 a_0 \cos \left(\omega t - \frac{\omega r}{c} \right), \quad (7)$$

колебательным давлением

$$P = \rho c \omega a_0 \sin \left(\omega t - \frac{\omega r}{c} \right), \quad (8)$$

колебательной плотностью, которая связана с колебательным смещением соотношением

$$\Delta \rho = -\rho \frac{\partial a}{\partial r}, \quad (9)$$

колебательной температурой

$$T = \frac{\beta T_0 \omega^2 a_0 c}{C_p} \sin \left(\omega t - \frac{\omega r}{c} \right), \quad (10)$$

где β — коэффициент объемного расширения среды; T_0 — средняя температура среды; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; ρ — плотность среды.

Смысл последнего уравнения (10) заключается в адиабатичности процессов сжатия и расширения среды в звуковой волне. В местах сжатия температура повышается, в местах расширения понижается, причем колебания температуры в звуковой волне при распространении ее в газообразной среде могут достигать заметной величины.

Помимо рассмотренных плоских звуковых волн существуют цилиндрические

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{r}} \cos \left(\omega t - \frac{\omega r}{c} \right) \quad (11)$$

и сферические волны

$$a = \frac{a_0}{r} \cos \left(\omega t - \frac{\omega r}{c} \right), \quad (12)$$

Величина колебательного смещения (а также другие параметры волны) в цилиндрических и сферических звуковых волнах с увеличением расстояния от источника колебаний уменьшается соответственно по закону $1/\sqrt{r}$ и $1/r$.

Скорость распространения звуковых волн в газах и жидкостях определяется по формуле

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (13)$$

где E — модуль упругости среды.

Для газов

$$E = \gamma P_0, \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}, \quad (15)$$

где C_v — удельная теплоемкость среды при постоянном объеме; P_0 — атмосферное давление.

Раньше мы предположили для простоты рассуждений, что звуковые волны при распространении не поглощаются средой. Реальные же звуковые волны поглощаются. Механизм поглощения связан, в первую очередь, с наличием теплопроводности и внутреннего трения в среде. С учетом поглощения уравнение плоской волны запишется в виде

$$a = a_0 e^{-\alpha r} \cos \left(\omega t - \frac{\omega r}{c} \right), \quad (16)$$

где α — коэффициент поглощения. В газах и жидкостях этот коэффициент сильно зависит от частоты. В воздухе и других газах он растет пропорционально квадрату частоты

$$\alpha = \alpha_0 \cdot f^2, \quad (17)$$

где α_0 зависит от температуры и плотности среды.

Для воздуха $\alpha_0 = 2 \cdot 10^{-13}$ сек²/см. Для воды вплоть до частот порядка 10^6 гц также выполняется квадратичная зависимость от частоты, причем $\alpha_0 = 3 \cdot 10^{-16}$ сек²/см. Легко заметить, что в воде звук поглощается меньше, чем в воздухе. При одной и той же частоте дальность распространения звука в воде в 700 раз больше, чем в воздухе.

Если в среде распространяется звуковая волна, то геометрическое место точек, до которых к некоторому моменту времени

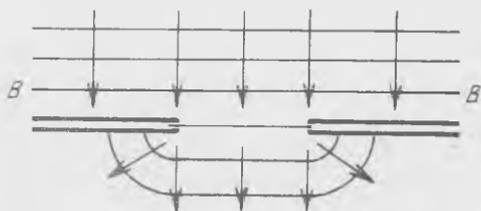


Рис. 2. Диффракция звуковых волн

дошло колебание, называется фронтом волны. Плоская волна имеет плоский фронт. Соответственно сферическая и цилиндрическая волны имеют сферический и цилиндрический фронты.

При распространении звуковых волн могут наблюдаться такие явления, как диффракция и интерференция. Явление диффракции поясняется на рис. 2. Звуковая волна с плоским фронтом (B—B) падает на препятствие с отверстием. Пройдя сквозь отверстие в препятствии, волна перестала быть плоской. Фронт волны загнулся за края отверстия. Это явление загибания звуковых волн за препятствия называется диффракцией. Интерференцию волны лучше наблюдать от двух источников S_1 и S_2 , излучающих сферические звуковые волны одинаковой частоты и амплитуды. Такой случай иллюстрирует рис. 3. Условно будем считать, что сплошные окружности изображают места сжатий среды в волне в некоторый момент времени, а пунктирные — места разрежений. Там, где волны перекрываются, среда будет подвергаться воздействию сразу двух волн, причем эти воздействия линейно складываются (при достаточно малой интенсивности волн). Так что, если в какой-то точке одна волна должна была бы привести к сжатию среды, а другая, наоборот, к растяжению, среда вообще окажется невозмущенной, ибо сжатие компенсируется растяжением (при одинаковых амплитудах). Таким образом, в результате интерференции мы будем иметь (рис. 3) максимальные сжатия в точках, где пересекаются сплошные линии (черные точки), максимальные растяжения там, где пересекаются пунктирные линии (черные квадраты). А там, где пересекаются сплошные линии с пунктирными, будет компенсация (светлые точки) сжатий растяжениями (полная или частичная).

При распространении звуковых волн малой амплитуды выполняется так называемый принцип суперпозиции или принцип

независимости распространения. Заключается он в том, что если две различные системы волн, исходящих из разных источников, перекрываются в некоторой области, а затем снова расходятся, то дальше каждая из них распространяется так, как если бы она не встречала на своем пути другую. В результате интерференции двух плоских волн с одинаковой частотой и амплитудой, идущих навстречу друг другу, могут образовываться так называемые стоячие волны.

Уравнение стоячей волны имеет вид

$$a = 2a_0 \cos\left(\frac{\omega r}{c}\right) \cos \omega t. \quad (18)$$

Стоячая волна имеет ту же частоту, что и встречные волны. А вот амплитуда стоячей волны зависит от координаты и определяется множителем $\cos(\omega r/c)$. В точках, где выполняется условие

$$\cos\left(\frac{\omega r}{c}\right) = 0, \quad (19a)$$

амплитуда все время равна нулю. Это так называемые узловые точки. В точках, где выполняется условие

$$\cos\left(\frac{\omega r}{c}\right) = 1, \quad (19b)$$

амплитуда может достигать вдвое большей величины, чем в каждой из встречных волн. Эти точки называются пучностями стоячей волны. Стоячие волны обычно образуются при отражении плоской волны от плоской стенки. Тогда отраженная волна складывается с падающей и образуется стоячая волна. Характер отражения звуковых волн от стенки зависит от физических свойств стенки. Если среда, от которой происходит отражение, более плотная, чем среда, в которой распространяется волна, то на границе всегда образуется узел стоячей волны. Если среда, от которой отражается волна, менее плотная, то на границе образуется пучность.

Образование узла на границе отражения от более плотной среды объясняется тем, что волна, отражаясь от более плотной среды, в месте отражения меняет свою фазу на прямо противоположную. Этот факт принято называть «потерей полуволны». При отражении от более мягкой среды изменения фазы не происходит, и на границе образуется пучность. Более подробно явления отражения звуковых волн от границы раздела сред, а также преломления звуковых волн будет рассмотрено в следующем параграфе в связи с особенностями распространения звука в различных условиях.

Звуковая волна в процессе распространения несет с собой определенную энергию. Поток звуковой энергии через площадку S ,

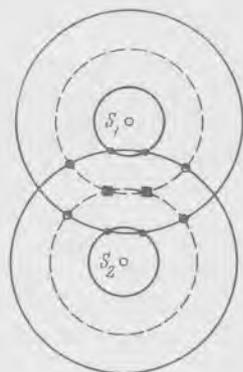


Рис. 3. Интерференция звуковых волн

перпендикулярную к направлению распространения волны, определяется соотношением

$$Q = P \cdot \dot{a} \cdot S, \quad (20)$$

где \dot{a} и P — соответственно колебательная скорость и колебательное давление в волне. Величина, определяемая соотношением

$$q = P \cdot \dot{a}, \quad (21)$$

называется плотностью потока энергии. В акустике и биоакустике имеют дело обычно с интенсивностью звуковой волны, которая представляет собой плотность потока энергии в единицу времени:

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} \text{ вт/см}^2, \quad (22)$$

или в ином виде

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 a_0^2. \quad (23)$$

Из последней формулы следует, что сила звука данной высоты пропорциональна квадрату амплитуды волны. Однако такой объективной оценке силы звука не соответствует субъективная оценка громкости, основанная на непосредственном ощущении. Дело в том, что наше ухо не одинаково чувствительно к звукам различной высоты (частоты): чтобы звуковая волна создала ощущение звука, необходимо, чтобы сила звука превышала некоторую минимальную величину, называемую порогом слышимости. Звук, сила которого лежит ниже порога слышимости, ухом не воспринимается. Порог слышимости различен для разных частот. Наиболее чувствительно человеческое ухо к колебаниям с частотами в области 1000—3000 гц. Для этой области частот порог слышимости достигает величины порядка 10^{-8} эрг/см²·сек. К более низким и более высоким частотам ухо значительно менее чувствительно. Колебания с частотами ниже 20 гц, называемые инфразвуковыми, и более 20 000 гц, называемые ультразвуковыми, ни при каких силах не воспринимаются как звуковые. Колебания очень большой силы, порядка 10^5 эрг/см²·сек, вызывают в ухе осязательное чувство давления, переходящее в болевое ощущение. Максимальная величина силы звука, при превышении которой возникает болевое ощущение, называется порогом болевого ощущения. Порог болевого ощущения несколько различен для различных частот. Между порогом слышимости и болевым порогом лежит область слышимости, изображенная на рис. 4. Субъективная громкость звука не поддается точному количественному измерению. Однако можно все же произвести оценку интенсивности ощущения, основываясь на психофизическом законе Вебера —

Фехнера, по которому изменение интенсивности ощущений пропорционально логарифму отношения энергий звука, вызывающих эти ощущения. На основании этого логарифмического закона устанавливается шкала уровней силы звука. Естественно принять уровень на пороге слышимости I_0 за нулевой. Условно за нулевой уровень принимается уровень, для которого $I_0 = 10^{-9}$ эрг/см²сек, т. е. несколько меньше порога слышимости для 1000 гц. Пороговому значению интенсивности соответствует



Рис. 4. Аудиограмма человека

пороговое значение амплитуды давления, равное $2 \cdot 10^{-4}$ бар. По закону Вебера — Фехнера громкость некоторого звука L пропорциональна логарифму отношения его силы I к силе того же звука на пороге слышимости I_0 :

$$L = k \lg \frac{I}{I_0}, \quad (24)$$

где k — коэффициент пропорциональности. Величину L обычно называют уровнем звука. Положив $k = 1$, мы тем самым выберем определенную единицу измерений уровней звука; эта единица носит название бела. Таким образом:

$$L = \lg \frac{I}{I_0} \text{ б.} \quad (25)$$

Чаще на практике пользуются единицами, в 10 раз меньшими, получившими название децибелов; по этому определению:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ дб.} \quad (26)$$

Если вместо отношения интенсивностей в формуле (26) использовать отношение давлений в звуковой волне, помня, что интенсивность пропорциональна квадрату давления, то:

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0} \text{ дб.} \quad (27)$$

Ниже приведены приблизительные значения уровней звука для ряда обычных звуков:

Звук	Уровень, дБ	Интенсивность, Вт/см ²	Амплитуда давления, бар
Тихий шепот	10	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Шаги по ковру	30	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$
Речь средней громкости	60	$1 \cdot 10^1$	$6,4 \cdot 10^0$
Шум оживленной улицы	70	$1 \cdot 10^1$	$2,0 \cdot 10^1$
Крик	80	$1 \cdot 10^2$	$6,4 \cdot 10^1$

Очень показателен следующий пример: если бы две тысячи человек вели непрерывный разговор в течение 1,5 час., то энергии их голосов хватило бы лишь на то, чтобы вскипятить один стакан воды.

2. Распространение звука над поверхностью земли

Предположим, что источник звука находится в точке O (рис. 5), а микрофон в точке P на расстоянии R от источника. Расстояния h_1 и h_2 будем считать большими по сравнению с длиной звуковой волны. Тогда звук от источника придет к микрофону двумя путями: непосредственно от O к P и, кроме того, отразившись от земли в точке A . Пусть угол падения ϑ_0 меньше угла полного внутреннего отражения. Эти два звуковых сигнала сложатся вблизи микрофона, причем каждый со своими амплитудами и фазами, и дадут суммарный сигнал, который может существенно отличаться от истинного звука, излученного в точке O . Мы рассмотрели простей-

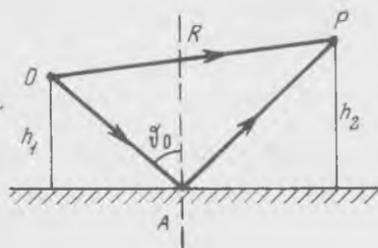


Рис. 5. Распространение звука над поверхностью земли

ший вариант. Еще хуже будет обстоять дело, если источник звука и микрофон будут располагаться непосредственно на земле или на расстояниях от земли, меньших длины звуковой волны. В этом случае угол падения будет превышать угол полного внутреннего отражения, что повлечет за собой искажение формы звукового сигнала при отражении от поверхности земли. Эти искажения могут оказаться более существенными, чем в предыдущем случае.

Наилучшим вариантом расположения источника звука и микрофона, при котором искажения будут минимальными, является такой, когда расстояние между источником звука и микрофоном много меньше, чем расстояние от них до земли. В этом случае доля отраженного от земли звукового сигнала будет пренебрежимо мала, и микрофон будет регистрировать неискаженный звук. И при всех условиях микрофон должен быть по возможности поднят над землей, даже если источник звука находится вблизи земли. Травяной покров на земле несколько улучшает условия регистрации биоакустических сигналов, так как он частично поглощает падающий на него звук и тем самым уменьшает долю отраженного от земли звукового сигнала. Все, сказанное выше, справедливо и в случае, когда источник звука и микрофон располагаются над поверхностью воды.

Мы здесь не рассматриваем случаи дальнего распространения звука в атмосфере, явлений рефракции, поскольку эти явления едва ли могут играть какую-либо роль в биоакустике.

3. Распространение звука в мелкой воде

Термин «мелкая вода» применяют в том случае, когда глубина водоема порядка длины звуковой волны или меньше ее. Рассмотрим идеализированный случай, когда слой воды ограничен плоским твердым дном и плоской свободной поверхностью (рис. 6). Источник звука O и гидрофон P располагаются в слое воды H на некоторой глубине (соответственно h_1 и h_2) и расстоянии r друг от друга. Распространение звука в таком слое воды имеет следующие особенности.

а) Не все звуки могут распространяться в слое воды. Могут распространяться только звуки, частоты которых выше некоторой критической, определяемой выражением

$$f_{\text{кр}} = \frac{c}{4H \sqrt{1 - n^2}}, \quad (28)$$

здесь c — скорость звука в воде; H — глубина слоя воды; $n = c/c_1$ — показатель преломления; c_1 — скорость звука в материале дна.

Рассмотрим конкретный пример: глубина H слоя воды равна 1 м, дно представляет собой уплотненный морской песок ($c_1 = 1800$ м/сек). Скорость звука в воде $c = 1500$ м/сек. В этом случае

$$f_{\text{кр}} = \frac{1500}{4 \cdot 1 \cdot \sqrt{1 - \frac{25}{36}}} \approx 680 \text{ гц.} \quad (29)$$

Звуки, частоты которых ниже 680 гц, ослабляются в десятки и сотни раз на расстоянии от излучателя порядка длины волны (2—3 м).

б) Звуки, частоты которых выше критической, распространяются в виде так называемых «нормальных волн» и боковой волны.

Нормальные волны — это звуковые волны строго определенных частот, которые распространяются вдоль слоя воды практически без затухания (поглощением звука в воде для простоты пренебрегаем). Нормальные волны обладают еще одним свойством: скорость их распространения зависит от частоты (так называемая

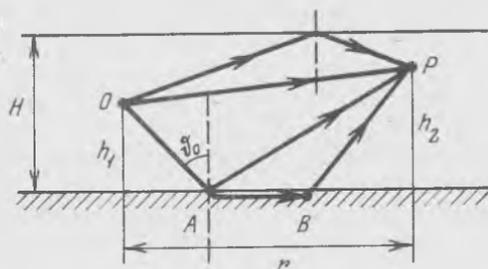


Рис. 6. Распространение звука в мелкой воде

геометрическая дисперсия). Это приводит к тому, что звуковой сигнал, имеющий широкий спектр частот, «расползается» при распространении в результате того, что отдельные его компоненты распространяются с различными скоростями. Амплитуды и частоты нормальных волн определяются глубиной слоя воды и упругими свойствами дна.

Боковая волна возникает в результате проникновения звука в дно водоема. Происходит это следующим образом. Звук из точки O распространяется не только в сторону гидрофона P , но и в других направлениях. Некоторые звуковые волны отражаются от границы раздела вода — воздух, другие — от дна. Отражаясь от дна, звуковые волны создают в грунте возмущения, которые распространяются (на участке AB рис. 6) со скоростью, превышающей скорость звука в воде, и порождают в воде боковые волны (луч BP). Интенсивность боковых волн может быть весьма значительной особенно на расстояниях, не очень больших от излучателя (несколько длин волн). А главное, боковая волна первой приходит к гидрофону, так как она распространяется со скоростью звука в грунте, большей, чем скорость звука в воде, и может играть роль «предвестника» основного сигнала, распространяющегося в воде. К появлению боковых волн приводят те звуковые волны (луч OA), которые падают на дно под углом, равным углу полного внутреннего отражения.

в) Распределение амплитуд нормальных волн по глубине водоема неравномерно. На границе раздела вода — воздух амплитуда давления всегда равна практически нулю. На границе раздела вода — дно она максимальна. По глубине водоема может быть несколько максимумов и минимумов амплитуды давления.

г) Усредненная интенсивность звука в слое воды с увеличением расстояния от источника звука спадает по закону $1/r^{3/2}$. Этот

закон является промежуточным между цилиндрическим законом $1/r$, выполняющимся при полном отражении от границ слоя, и сферическим законом $1/r^2$, выполняющимся при отсутствии отражений от границ. Закон «трех вторых» учитывает частичное поглощение волн при многократных отражениях их от границ слоя. Практически закон «трех вторых» выполняется на расстояниях от излучателя, в несколько десятков раз превышающих глубину водоема. Вблизи излучателя выполняется цилиндрический закон спада интенсивности звука.

4. Звук в помещении или бассейне

Вопрос о распространении звука в ограниченном пространстве очень важен ввиду того, что многие биоакустические исследования проводятся в помещении (работы с некоторыми видами птиц) или бассейне (рыбы, дельфины, ластоногие). При этом необходимо знать, как влияет геометрия помещения или бассейна на параметры изучаемых звуков животных. Основные закономерности распространения звука в помещении и бассейне одинаковы, поэтому мы в дальнейшем будем говорить только о помещении, имея в виду одновременно и бассейны. Если биоакустические измерения проводятся в помещении, то помещение должно передавать все частоты звука одинаково хорошо, и переходные процессы не должны существенно искажать звук. Это может быть достигнуто покрытием стен, пола и потолка совершенным звукопоглотителем, в результате чего они не будут отражать звук обратно в помещение. Однако это не простая задача и потому надо знать, какие искажения звука вызывает несовершенство поглотителя и при каких условиях этими искажениями можно пренебречь. Кроме того, желательно знать, при каких условиях можно работать вообще в незаглушенном помещении с минимальными искажениями сигнала. Незаглушенное помещение можно рассматривать как резонатор, имеющий много резонансных частот. Если в таком помещении излучается звук, то из его общего спектра выделятся те частоты, которые совпадают с собственными частотами помещения. Естественно, что такой звуковой сигнал будет заметно искажен. Особенно заметны будут искажения в низкочастотной части спектра, где резонансные частоты помещения довольно далеко отстоят друг от друга по шкале частот.

Распределение интенсивности звука в помещении также зависит от частоты. На низких частотах распределение очень неравномерно; с увеличением частоты неравномерность распределения интенсивности уменьшается. Звуковое поле как бы «размазывается» по всему объему помещения, становится диффузным. Диффузное поле одинаково почти в любой точке помещения. Исключения составляют углы помещения и часть пространства вблизи источника звука, где звуковое поле может заметно (в 2—3 раза) отличаться от диффузного поля даже на высоких частотах. Поэ-

тому при биоакустических измерениях не следует располагать источники звука и микрофоны (или гидрофоны) по углам и ребрам помещения (или бассейна). Можно сформулировать следующее правило для определения нижнего предела области равномерного распределения интенсивности. Если источник излучает звуковую энергию в интервале частот от f до $f + \Delta f$ в помещении объемом V (в м^3), то распределение интенсивности в этом помещении по частоте и объему будет равномерно для всех частот, лежащих выше f_{\min} , где

$$f_{\min} \simeq \sqrt{\frac{c^3}{4\pi V (\Delta f + 4/T)}}, \quad (30)$$

где T — время реверберации (в сек.), представляющее собой интервал, в течение которого звуковая энергия в помещении уменьшается (затухает) после выключения источника звука в 10^6 раз. В частности, для помещения размером $15 \times 30 \times 60 \text{ м}^3$ этот нижний предел равномерности составит около 10 гц. Выше этой частоты в помещении не будет заметных резонансных флуктуаций интенсивности звука. Если звук представляет собой чистый тон, то в формуле (30) следует положить $\Delta f = 0$.

Время реверберации помещения может быть вычислено по формуле Эйринга

$$T = \frac{0,07V}{S \lg \frac{1}{1-\alpha}}. \quad (31)$$

Здесь α — среднее значение коэффициента поглощения поверхностей помещения; S — площадь отражающих поверхностей. Для малых поглощений ($\alpha < 0,2$) формула (31) упрощается и принимает вид формулы Сэбина

$$T = \frac{0,161V}{S \cdot \alpha}. \quad (32)$$

Для водной среды (в бассейне) эти формулы имеют другие численные коэффициенты (Клюкин, Колесников, 1968):

формула Эйринга

$$T = \frac{1,6 \cdot 10^{-2} \cdot V}{S \lg \frac{1}{1-\alpha}}, \quad (33)$$

формула Сэбина

$$T = \frac{3,7 \cdot 10^{-2} V}{S \cdot \alpha}. \quad (34)$$

Последняя формула применима для бассейнов без звукозаглушения стен и зеркала воды бассейна.

Неравномерность звукового поля в помещении очень зависит от симметрии помещения. Чем более симметрично помещение, тем

больше будет диапазон частот, в котором наблюдаются флуктуации интенсивности, и тем оно будет менее пригодно для проведения в нем биоакустических измерений. Например, хуже всего будет обстоять дело в помещении сферической формы (если бы такое можно было себе представить), лучше — в помещении цилиндрической формы, еще лучше — в помещении прямоугольной формы. Но есть помещение, в котором поле будет равномернее, чем даже в случае прямоугольного помещения. Это помещение с непараллельными противоположными стенками, а также потолком и полом. Обычно такой формы делают так называемые звукомерные камеры.

Степень диффузности звукового поля можно определить экспериментально. Для этого следует измерить закон спада давления в поле при изменении расстояния между направленными источниками звука и приемником. В непосредственной близости от источника звуковое давление должно спадать как $1/r$, где r — расстояние между источником и приемником. С увеличением расстояния степень спада должна уменьшаться и, начиная с некоторых расстояний, давление должно оставаться неизменным, не зависящим от расстояния. С этого расстояния и начинается диффузное поле.

Несколько слов следует сказать о том, как реагирует помещение на включение и выключение звука (или на импульсный звук). Если источник только начинает работать, то в помещении возникает сложный колебательный процесс, состоящий из суммы стационарных колебаний, имеющих частоту источника, и затухающих переходных колебаний, имеющих частоты тех резонансов, которые окажутся возбужденными. Стационарное (установившееся) колебание можно рассматривать как сумму большого числа стоячих волн, у которых амплитуды зависят от частоты источника и от положения источника в помещении. После того как переходные колебания затухнут (через время реверберации), оставшиеся стационарные колебания будут иметь только частоту источника. Когда источник выключают, стоячие волны сразу не исчезают, их энергия трансформируется в энергию переходных колебаний, которые имеют свои собственные частоты и постепенно затухают по экспоненциальному закону. В некоторых случаях они интерферируют друг с другом, образуя биения.

Мы рассмотрели распространение звука в незаглушенном помещении или бассейне. Биоакустические измерения в незаглушенном помещении (в диффузном поле) можно проводить в том случае, например, когда надо изучить спектр достаточно длительного (по сравнению с временем реверберации) и достаточно высокочастотного в соответствии с формулой (30) звукового сигнала. Если же ставится задача, скажем, изучения диаграмм направленности излучения животного, то такие измерения лучше всего проводить в хорошо заглушенном помещении, если нет возможности работать в свободном (неограниченном) пространстве.

В качестве звукопоглощающих материалов в воздухе используют обычно минеральные волокнистые материалы. Звукопоглощающие конструкции выполняют в виде клиньев, конусов и других форм, обеспечивающих более или менее плавный переход от акустического сопротивления воздуха к акустическому сопротивлению стен помещения. В воде для заглушения бассейнов также используют клинья, конуса и ребра, изготовленные из минеральной или металлической ваты, помещенной в вязкую жидкость, отделяемую звукопрозрачной пленкой от воды, из дерева, цементно-опилочных материалов, резины с различными наполнителями. Качество звукопоглощающего покрытия проверяют чаще всего путем измерения спада звукового давления при изменении расстояния от точечного источника. При хорошем заглушении закон спада должен быть сферическим.

5. Прохождение звука через границу раздела воздух — вода

Вопрос о прохождении звука через границы раздела воздух — вода приобретает особую важность в связи с биоакустическими исследованиями водных животных. Представим себе, например, что производится регистрация звуков рыб. Известно, что звуковое давление, излучаемое рыбами, в большинстве случаев невелико и составляет десятки, в лучшем случае, сотни бар. В воздухе над водоемом звучат голоса птиц, разговаривают люди. Спрашивается, будут ли звуки, распространяющиеся в воздухе, проникать в воду и служить помехой? Вот с этой точки зрения мы и будем анализировать процесс прохождения звука через границу раздела воздух — вода.

Рассмотрим задачу об отражении плоской звуковой волны от плоской границы раздела двух сред (рис. 7). Плотность среды, из которой падает волна, обозначим через ρ , а скорость звука в ней через c . Соответственные величины в нижней среде обозначим через ρ_1 и c_1 . Угол падения волны обозначим через ϑ , угол преломления — через ϑ_1 . Коэффициент отражения интенсивности звуковой волны запишется в виде

$$\frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} = \left(\frac{\frac{\rho_1 c_1}{\cos \vartheta_1} - \frac{\rho c}{\cos \vartheta}}{\frac{\rho_1 c_1}{\cos \vartheta_1} + \frac{\rho c}{\cos \vartheta}} \right)^2, \quad (35)$$

а коэффициент прохождения в виде

$$\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}} = \left(\frac{\frac{2\rho_1 c_1}{\cos \vartheta_1}}{\frac{\rho_1 c_1}{\cos \vartheta_1} + \frac{\rho c}{\cos \vartheta}} \right)^2 \cdot \frac{\rho c}{\rho_1 c_1}, \quad (36)$$

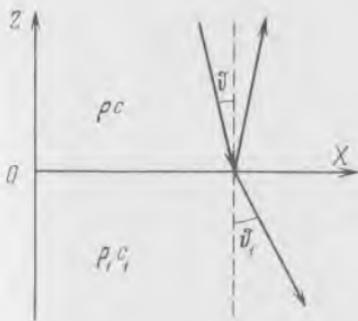
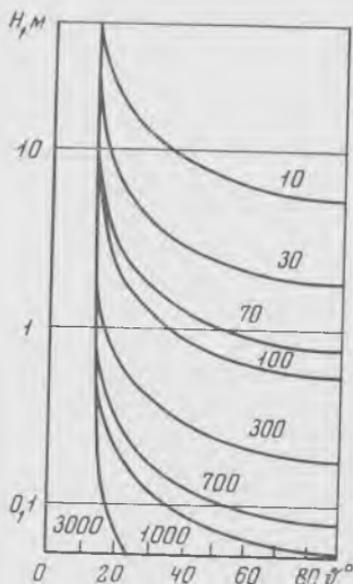


Рис. 7. Отражение и преломление звука на границе раздела сред

Рис. 8. Номограмма для определения глубины проникновения звука из воздуха в воду (частота — в гц)



здесь $I_{\text{пад}}$, $I_{\text{отр}}$ и $I_{\text{пр}}$ — интенсивность соответственно падающей звуковой волны, отраженной и прошедшей через границу раздела. Учитывая, что $\rho c \ll \rho_1 c_1$ (акустическое сопротивление воздуха много меньше акустического сопротивления воды), можно сделать вывод о том, что доля энергии волны, прошедшей из воздуха в воду, пренебрежимо мала. Действительно, подсчеты показывают, что из воздуха в воду проходит одна тысячная энергии волны. Однако это не значит, что долей звуковой волны, прошедшей из воздуха в воду, можно пренебречь во всех случаях. Здесь есть одна интересная особенность. Величина звукового давления в прошедшей волне в 2 раза больше, чем в падающей, несмотря на то, что энергия прошедшей волны в тысячу раз меньше энергии падающей. Объясняется это тем, что энергия волны определяется не только квадратом амплитуды звукового давления в волне, но и акустическим сопротивлением среды, в которой волна распространяется. Акустическое же сопротивление воды, как уже отмечалось выше, во много раз больше акустического сопротивления воздуха. Это значит, что звуки птиц и человеческая речь при переходе в воду становятся в 2 раза «громче», если «громкость» в данном случае отождествить с величиной звукового давления, а для гидрофонов это так и есть. Причем это справедливо при любых углах падения звука на поверхность воды. От угла падения зависит лишь затухание звуковой волны, прошедшей из воздуха в воду. При углах падения до $13^\circ 41'$ затухание звука в воде обычное (не очень большое). Этот угол называется углом полного внутреннего отражения. При углах падения, больших указанного выше, звуковая волна, прошедшая в воду, далеко не распространяется и очень быстро затухает. Это так называемая неоднородная волна.

Если глубиной проникновения считать глубину, на которой неоднородная волна уменьшается по амплитуде примерно в 3 раза (точнее в e раз, где e — основание натуральных логарифмов, равное приблизительно 2,71), то для определения глубины проникновения можно воспользоваться номограммой, приведенной на рис. 8. Из номограммы, например, видно, что звуковая волна с частотой 100 гц, падающая на поверхность воды под углом 35° на глубине 1 м, уменьшается по амплитуде всего лишь в 3 раза.

Наоборот, если волна падает из воды на границу ее с воздухом, то вследствие того, что плотность воздуха значительно меньше плотности воды, звуковое давление в прошедшей волне в воздухе будет во много раз меньше звукового давления в падающей волне (в воде). Таким образом, при переходе звуковой волны из одной среды в другую и обратно отсутствует симметрия по отношению к значениям звукового давления.

Теперь мы можем ответить на вопрос, поставленный в начале настоящего пункта. При регистрации звуков водных животных и вообще в экспериментах с водными животными следует соблюдать строжайшую тишину, помня, что в воде на сравнительно небольшой глубине голос слышен очень хорошо.

6. Искажения звукового поля, обусловленные присутствием человека-оператора

Биоакустические исследования на этапе регистрации звуков наземных животных осуществляются обычно человеком-оператором, в распоряжении которого есть регистрирующая аппаратура в виде микрофона и магнитофона. Здесь мы рассмотрим, какие предосторожности должен соблюдать человек-оператор, чтобы свести к минимуму возможные искажения регистрируемого звукового поля, обусловленные присутствием самого человека-оператора или каких-либо посторонних предметов. Любой предмет (одушевленный или неодушевленный), находящийся в звуковом поле, искажает его, отражая и рассеивая звуковые волны. В этом случае поле рассеяния накладывается на поле излучения, и суммарное поле может существенно отличаться от поля излучения. Наиболее заметны эти изменения вблизи предмета, рассеивающего звуковую волну. С удалением от него поле рассеяния ослабляется, и степень искажения поля излучения уменьшается.

Для пояснения сказанного выше рассмотрим конкретный пример: человек-оператор производит запись звуков какого-либо животного в воздухе, держа микрофон в руке. В этом случае микрофон регистрирует не только звуки, идущие непосредственно от животного, но и звуки, рассеянные телом человека (Hedegaard, 1968).

На рис. 9 показано, как присутствие человека среднего роста искажает звуковое поле. По оси абсцисс отложено расстояние от человека (в м). По оси ординат — флуктуации уровня звукового

Рис. 9. Искажение звукового поля в присутствии человека (звук тональный)

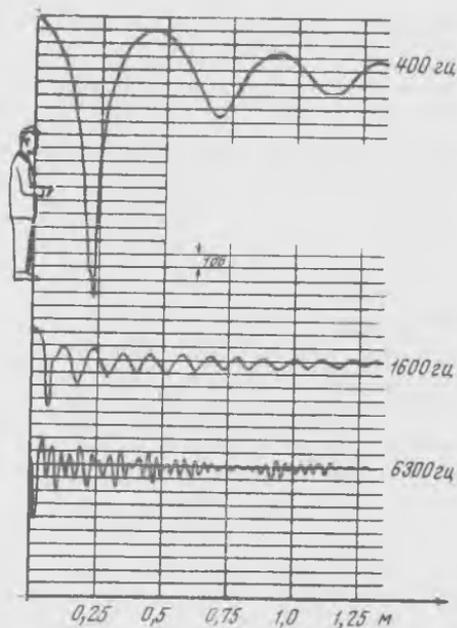
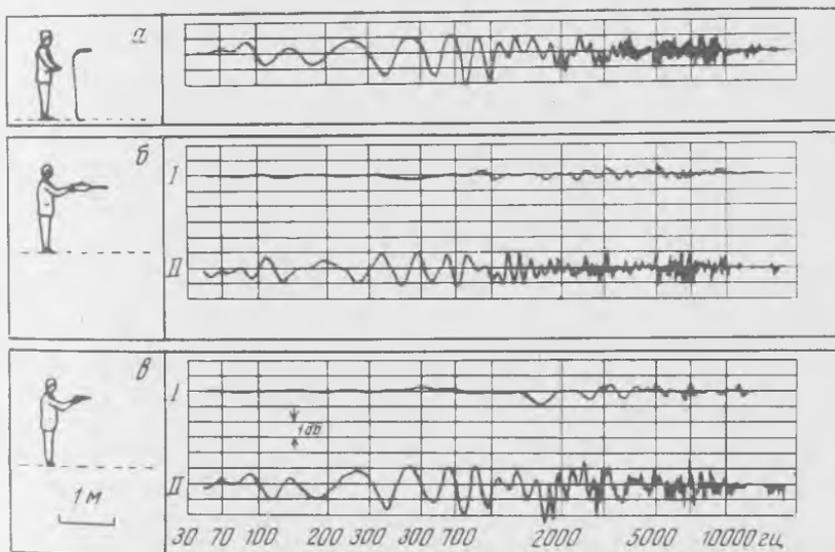


Рис. 10. Искажение звукового поля в присутствии человека (звук широкополосный)



поля в присутствии человека. Видно, что, например, на частоте 400 гц флуктуации поля на расстоянии 25 см от тела человека могут достигать 17 дб. С ростом частоты флуктуации поля уменьшаются.

На рис. 10, а, б и в приведены спектрограммы широкополосного шума (по горизонтальной оси — частота в герцах), зарегистри-

рованные с помощью микрофона, который в случае (а) установлен на тонкой подставке на расстоянии 0,8 м от тела человека, в случае (б) микрофон находится в вытянутой руке человека на расстоянии 1 м от тела (кривая 2) и в случае (в) микрофон — в руке человека на расстоянии 0,8 м от тела (кривая 2). На графиках б и в показаны также спектрограммы того же шума, зарегистрированные тем же микрофоном, но в отсутствие человека (кривые 1). Видно, что искажения поля наиболее заметны в диапазоне частот 300—1000 гц.

Таким образом, человек-оператор должен находиться при измерениях не ближе, чем в 1 м от микрофона. Лучше, если микрофон будет установлен на подставке, а человек будет в отдалении. В равной мере приведенные рассуждения относятся ко всякому иному предмету, находящемуся в поле регистрируемых звуковых волн, будет ли это большой камень, куст или дерево. Лучше при измерениях микрофон устанавливать на открытом месте, вдали от подобных предметов.

ИЗЛУЧАТЕЛИ И ПРИЕМНИКИ ЗВУКА

1. Излучатели звука

В биоакустических экспериментах часто используют излучатели звука и ультразвука, предназначенные для работы в газообразной и жидкой среде. При этом излучатели должны отвечать определенным требованиям, специфическим для биоакустических экспериментов. Поэтому не все излучатели звука, получившие широкое распространение в различных областях техники, могут быть успешно применены в биоакустике. В частности, в биоакустике, по видимому, не нужны фокусирующие излучатели, а также излучатели, работающие в мегагерцевом диапазоне частот и т. п.

При биоакустических исследованиях используют как широкополосные излучатели, так и резонансные. Для работы в воздухе нужны излучатели, работающие в диапазоне частот до $10 \div 20$ кГц. При экспериментах в воде диапазон рабочих частот расширяется на порядок. Требуемая мощность излучателей, как правило, невысока.

Для излучения звука в воздушной среде чаще всего применяют электродинамический громкоговоритель (Клюкин, Колесников, 1968). Характеристики излучения громкоговорителя в большой мере зависят от способа его акустического оформления. Существуют два основных способа такого оформления: либо громкоговоритель укрепляется в отверстии плоского экрана (в передней стенке ящика, открытого сзади), либо в отверстии полностью закрытого ящика, внутри которого помещают звукопоглощающий материал с целью подавления собственных колебаний воздушного объема. В первом случае громкоговоритель работает как двусторонний поршень, причем звуковые волны, огибающие экран, значительно ослабляют одна другую при наложении. По достижении частоты $f \simeq 170/d$ гц, где d — размер экрана (в м), интерференция переднего и обратного излучений не играет заметной роли, и громкоговоритель работает как односторонний поршень. На частотах выше $f \simeq 8 \cdot 10^5/R$, где R — радиус основания конуса, диффузор перестает работать как поршень и должен рассматриваться как колебательная система с распределенными параметрами. Излучаемая мощность при этом резко падает. Излучение громкоговорителей в области самых низких частот ограничивается резонансом подвижной системы (частота резонанса определяется массой

звуковой катушки и диффузора и упругостью подвеса центрирующей шайбы). Ниже резонанса механическое сопротивление подвижной системы, имеющее упругий характер, возрастает по мере понижения частоты, колебательная скорость диффузора падает, и излучаемая акустическая мощность резко уменьшается.

В закрытом ящике конусный громкоговоритель работает как односторонний поршень и в области низких частот, так как явление интерференции на его работе не сказывается. Такое оформление лучше предыдущего в области низких частот.

Громкоговоритель можно использовать и без ящика (или экрана) вообще. Но в этом случае характеристики его излучения в области низких частот будут наихудшими.

Согласно ГОСТ 7323-55, абсолютной осевой чувствительностью громкоговорителя называется отношение звукового давления, развиваемого громкоговорителем на расстоянии 1 м по направлению его акустической оси, к корню квадратному из подводимой электрической мощности. Предполагается, что ток синусоидален, и излучение производится в условиях свободного поля. Стандартное звуковое давление, развиваемое громкоговорителем, определяется на расстоянии 1 м на акустической оси при подведении к зажимам громкоговорителя мощности, равной 0,1 ва.

В табл. 1 приведены основные характеристики некоторых типов громкоговорителей, которые могут быть использованы в биоакустике.

Весьма перспективными представляются излучатели звука, основанные на использовании колебаний ионного облака, — ионофоны, а также электростатические излучатели, обладающие хорошими частотными характеристиками при малых нелинейных искажениях. Однако в настоящее время они не выпускаются промышленностью, их изготовление, по существу, ограничивается опытными образцами.

Перечисленные излучатели звука обеспечивают невысокую акустическую мощность. Если же требуются большие мощности излучения, могут быть использованы аэродинамические источники звука — сирены с вращающимся ротором (динамические) и сирены газоструйные (статические). С помощью сирен можно добиться высокой интенсивности звука (140—160 дБ относительно $2 \cdot 10^{-5}$ н/м²) как на отдельных частотах, так и в некоторых (хотя и довольно узких) диапазонах частот.

Несколько слов следует сказать об излучателях электромагнитного типа, используемых в наушниках и телефонных трубках. В них возбуждаются колебания мембраны из мягкого железа под действием силы электромагнита, питаемого переменным током звуковой частоты. Колебания мембраны передаются воздушной среде.

Для излучения звука в жидкость (воду) используют различные типы преобразователей, рассчитанные, как правило, на работу в определенном частотном диапазоне. На низких и средних

Таблица 1

Тип громкоговори- теля	Размер диффузора, мм	Номинальная мощность, вт	Полоса воспроиз- водимых частот, гц	Стандартное звуко- вое давление, н/м ²	Частота резонанса, гц	Неравномерность частотной характе- ристики, дб	Коэффициен т гармоник, %	
							до 200 гц	до 2000 гц
0,5ГД-10	105	0,5	150—7000	0,23	150	14	10	7
1ГД-9	156/98 *	1,0	100—7000	0,25	90	12	12	5
2ГД-3	152	2,0	70—10 000	0,25	80	14	12	7
2ГД-4	152	2,0	70—10 000	0,23	80	14	10	7
4ГД-1	202	4,0	60—12 000	0,25	60	15	15	5
5ГД-9	252	5,0	70—7000	0,3	70	12	15	7
5ГД-10	252	5,0	50—12 000	0,3	50	15	15	5
5ГД-14	254/170 *	5,0	70—12 000	0,25	70	14	15	5
10ГД-18	324/212 *	10,0	50—8000	0,3	40	12	10	5

* Диффузор эллиптический, в числителе размер большей оси, в знаменателе — мень-
шей.

частотах (до 2000 гц) могут быть применены электродинамические и электромагнитные излучатели, на более высоких звуковых частотах — магнитоотрицательные, пьезоэлектрические и электростатические. Наиболее широкое распространение в биоакустике получили пьезоэлектрические излучатели. Поэтому на них мы остановимся подробнее. Однако несколько слов следует сказать и об остальных типах излучателей.

Отличие условий работы преобразователей, излучающих звук в воде, от аналогичных условий для устройств, работающих в воздухе, проявляется главным образом в том, что удельное акустическое сопротивление воздуха ($410 \text{ н}\cdot\text{сек}/\text{м}^3$ в системе СИ) значительно меньше соответствующего сопротивления воды ($1,5 \cdot 10^6 \text{ н}\cdot\text{сек}/\text{м}^3$). Кроме того, гидростатическое давление в воде сильно изменяется по мере погружения излучателя в воду, тогда как атмосферное давление при подъеме излучателя на различную высоту изменяется незначительно. Излучатели, эффективные в воздухе, не обеспечивают той же эффективности, находясь в воде, а подводные излучатели малоэффективны в воздухе.

Тем не менее иногда излучатели, предназначенные для работы в воздухе, могут быть успешно применимы в воде при выполнении небольших конструктивных изменений. Обычные громкоговорители и даже наушники могут эффективно излучать в воду, если их заключить в герметичную резиновую оболочку, заполненную воздухом. В этом случае оболочка с воздухом играет роль резо-

натора с сосредоточенными параметрами. Роль массы играет присоединенная масса воды, а роль упругости — упругость воздуха в оболочке. Резонансную частоту такого излучателя легко вычислить по формуле (Claude, 1960):

$$f = \frac{6,6}{d} \left(1 + \frac{h}{10} \right)^{0,5}, \quad (37)$$

где d — диаметр оболочки (в м); h — глубина погружения излучателя (в м). Добротность такого излучателя невысока,

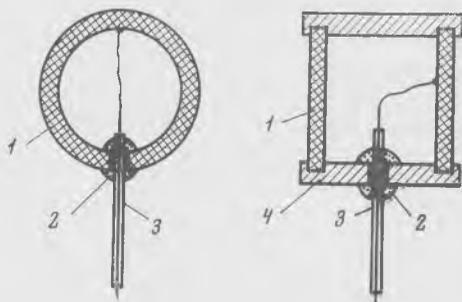


Рис. 11. Конструкция сферического и цилиндрического излучающих пьезоэлементов

поэтому он может эффективно излучать в достаточно широком диапазоне частот от десятков до сотен герц.

Магнитострикционные излучатели обладают ярко выраженными резонансными свойствами и эффективно излучают ультразвук в воду в узких частотных полосах в диапазоне десятков килогерц. В биоакустике они не нашли широкого применения, поэтому мы не будем на них подробно останавливаться.

Рассмотрим конструкции наиболее распространенных излучателей из пьезоэлектрической керамики титаната бария (BaTiO_3) и цирконата титаната свинца (ЦТС) сферической и цилиндрической формы и приведем приближенные выражения для расчета создаваемого ими звукового давления при возбуждении их электрическим напряжением. При этом имеется в виду использование таких излучателей на частотах ниже их первой резонансной частоты при возбуждении радиальных колебаний.

На рис. 11 показаны конструкции сферического и цилиндрического излучающих пьезоэлементов (1). Электроды наносят на внутреннюю и внешнюю поверхности вжиганием серебра. Вывод (3) внутреннего электрода осуществляют через изолятор (2) в отверстии сферы или крышки цилиндра (4). Выводы электродов присоединяют к кабелю и герметизируют. Для более надежной защиты от влаги весь излучающий элемент еще герметизируют резиной с помощью вулканизации.

Звуковое давление, создаваемое цилиндрическим излучателем на расстоянии r по оси цилиндра при условии, что длина образующей цилиндра больше звуковой волны и напряжение на об-

кладках излучателя поддерживается постоянным, определяется выражением

$$P = \frac{U \sqrt{f^3} D \left[D - d \left(1 - \frac{d_{33}}{d_{31}} \right) \right] d_{31} \pi^2 \rho \sqrt{c}}{2,3 \sqrt{r} (D - d) \lg \frac{D}{D - 2d}}, \quad (38)$$

где D — диаметр цилиндра; d_{33} , d_{31} — пьезоэлектрические модули керамики; ρ — плотность воды; c — скорость звука в воде; d — толщина стенки цилиндра.

Формула (38) действительна на расстояниях, не превышающих значение $r = L^2/\lambda$ при условии $L > 2\lambda$ (λ — длина звуковой волны в воде, L — длина образующей цилиндра).

Например, цилиндрический пьезоэлектрический излучатель из промышленной керамики BaTiO_3 диаметром $D = 5 \cdot 10^{-2}$ м с толщиной стенки $d = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м на частоте $f = 10^4$ гц при возбуждении его напряжением $U = 50$ в на расстоянии $r = 1$ м создает давление, равное 145 н/м^2 (1450 дин/см^2). При этом его длина должна быть не менее $0,3$ м (больше, чем 2λ).

При использовании керамики ЦТС-19 звуковое давление при тех же условиях будет примерно в 2 раза больше. Звуковое давление, создаваемое сферическим излучателем, размеры которого меньше длины звуковой волны в воде на расстоянии $r > \frac{D^2}{\lambda}$, равно

$$P = \frac{U \cdot f^2 D^2 \left[D - d \left(1 - \frac{d_{33}}{d_{31}} \right) \right] d_{31} \pi^2 \rho}{2rd}, \quad (39)$$

Например, для сферы из промышленной пьезокерамики BaTiO_3 диаметром $D = 5 \cdot 10^{-2}$ м с толщиной стенки $d = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м на частоте $f = 10^4$ гц при возбуждении напряжением $U = 50$ в звуковое давление, развиваемое излучателем на расстоянии 1 м, равно 19 н/м^2 (190 дин/см^2).

Здесь необходимо сказать несколько слов о ближнем поле излучателей (Ван-Бергейк, 1969). Под ближним полем излучателя будем понимать поле на расстоянии от излучателя, не превышающем длины звуковой волны. На таком расстоянии звуковое поле имеет более сложный характер, чем вдали от излучателя. Если вдали от излучателя (на расстоянии многих длин волн) колебательное (по синусоидальному закону) смещение частиц воды связано с колебательным давлением простым соотношением

$$a = \frac{P_0}{\rho c \omega} \cdot \frac{1}{r}, \quad (40)$$

где c — скорость звука в воде; ρ — плотность; $\omega = 2\pi f$; f — частота колебаний, то вблизи излучателя колебательное смещение существенно больше, чем следует из формулы (40). Чтобы пояснить это, рассмотрим рис. 12, на котором изображена пуль-

сирующая сфера среднего радиуса r_1 . В процессе колебаний радиус сферы изменяется и может быть представлен в виде $r_1 + \Delta r$. При расширении сфера оказывает давление на воду в радиальном направлении, а поскольку вода в значительной степени несжимаема, это смещение частиц воды переходит дальше, что позволяет вычертить концентрические сферы, описывающие точки равного смещения. С увеличением расстояния от источника колебаний величина смещения частиц уменьшается, так как

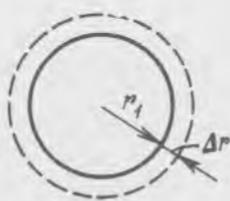


Рис. 12. Пульсирующая сфера

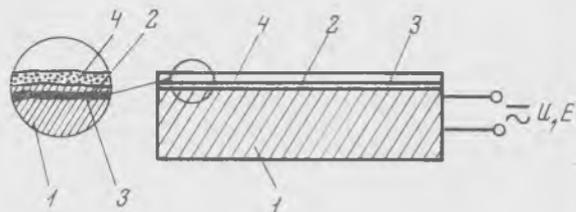


Рис. 13. Конструкция излучателя электростатического типа

1 — корпус; 2 — гальваническое покрытие; 3 — тонкая органическая пленка; 4 — защитный слой

исходный объем вытесненной воды распределяется по большей поверхности. Таким образом, величина смещения частиц воды на некотором расстоянии r от сферы (но при выполнении условий $r < \lambda$) будет связана с величиной смещения непосредственно у стенок сферы соотношением

$$a = \frac{r_1^2}{r^2} \Delta r. \quad (41)$$

Величина смещения в формуле (41) изменяется с расстоянием как $1/r^2$, тогда как закон изменения смещения в звуковой волне по формуле (40) определяется законом изменения давления, т. е. $1/r$. Будем называть смещение частиц по формуле (40) — акустическим, а по формуле (41) — гидродинамическим. Простой расчет показывает, что вблизи излучателя акустическая часть смещения частиц воды в kr_1 раз меньше гидродинамической, где $k = 2\pi/\lambda$.

Описанный эффект наблюдается и у других типов излучателей.

Это обстоятельство необходимо помнить при проведении экспериментов, в частности с рыбами по выяснению их реакции на звук.

Излучатели электростатического типа с твердым диэлектриком пока не получили в биоакустике широкого распространения, но они обладают некоторыми полезными свойствами, которые делают их даже более предпочтительными, чем пьезоэлектрические. Конструкция излучателя показана на рис. 13. В качестве диэлектрика используют тонкие (6–20 мк) органические пленки,

на которые нанесен металлический слой, служащий одним электродом. Вторым электродом служит массивный металлический корпус излучателя. Под воздействием постоянного (U) и переменного (E) электрических полей, одновременно приложенных к пленке, последняя деформируется и излучает звук. Возникающие электрические силы пропорциональны площади и обратно пропорциональны толщине пленки. Постоянное электрическое поле необходимо для линейаризации эффекта излучения, причем постоянное поле должно быть больше переменного.

Достоинством электростатических излучателей является относительно малая зависимость изменения звукового давления от частоты (линейное возрастание с частотой при поддержании постоянной величины переменного электрического напряжения на излучателе), благодаря чему удается обеспечить постоянство их чувствительности в режиме излучения (т. е. постоянство отношения создаваемого излучателем звукового давления к току возбуждения, протекающему через излучатель) в широком диапазоне частот.

К недостаткам этих излучателей следует отнести сильную зависимость чувствительности от статического давления, что требует использования специальных конструкторских мер для ее компенсации. Кроме того, сама конструкция электростатического излучателя существенно сложнее, чем пьезоэлектрического, и не всегда может быть выполнена простыми средствами.

При биоакустических исследованиях иногда возникает необходимость эффективного излучения звука в узкой области частот. Это бывает нужно, например, при экспериментах с животными по выработке условных рефлексов на звук. В воздушной среде для этой цели применимы обычные громкоговорители. В водной среде могут быть использованы описанные выше сферические и цилиндрические пьезокерамические излучатели, работающие

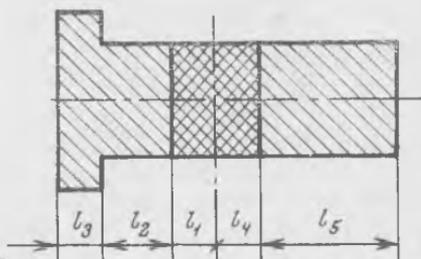


Рис. 14. Резонансный вибратор

В резонансном режиме. Однако сферы и цилиндры из пьезокерамики иногда бывают более дефицитными, чем плоские элементы (пьезокерамические диски). Поэтому мы рассмотрим здесь одну резонансную конструкцию с использованием плоских пьезокерамических активных элементов (Шофилд, 1965). Такая конструкция может быть изготовлена на любую рабочую частоту в нужном диапазоне частот. Схематически конструкция показана на рис. 14. Вся конструкция представляет собой резонансный

вибратор, в среднюю часть которого вклеена пьезокерамическая пластинка. Каждую половину вибратора (от нейтральной линии вправо и влево) можно рассматривать отдельно как четверть-волновой вибратор. Условия резонанса для левого вибратора записываются в виде

$$\frac{\omega M \operatorname{tg} k_2 l_2}{\rho_2 c_2 S_2} + \frac{\omega M \operatorname{tg} k_1 l_1}{\rho_1 c_1 S_1} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} (\operatorname{tg} k_1 l_1) (\operatorname{tg} k_2 l_2) = 1, \quad (42)$$

для правого —

$$\frac{\rho_5 c_5}{\rho_4 c_4} (\operatorname{tg} k_4 l_4) (\operatorname{tg} k_5 l_5) = 1, \quad (43)$$

где ρ , c , S , l — соответственно плотность, скорость звука, площадь поперечного сечения и длина каждого из слоев вибратора; M — масса головной насадки; $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны в материале соответствующего слоя. Излучающим поршнем служит головная насадка. Крепление всей конструкции лучше всего осуществлять в области нейтральной линии, являющейся узлом колебательной скорости. Описанные конструкции могут быть изготовлены на фиксированные частоты в диапазоне от 5 до 120 кгц.

2. Микрофоны

Для приема звука в воздухе используют микрофоны. Наиболее широкое применение получили микрофоны двух типов: электродинамические и конденсаторные. По характеристикам направленности различают три типа микрофонов — приемники давления, градиента давления и комбинированные (Клюкин, Колесников, 1968).

Микрофоны характеризуются следующими параметрами:

— осевой чувствительностью — отношением напряжения холостого хода, развиваемого микрофоном, к звуковому давлению гармонической волны, падающему в направлении этой оси. Чувствительность определяется по полю, т. е. без учета искажения микрофоном звукового поля, и по фактическому давлению на чувствительном элементе микрофона;

— направленностью — распределением чувствительности микрофона при падении на него звуковой волны под различными углами, отнесенной к его осевой чувствительности;

— уровнем собственного шума микрофона, определяемым относительно эффективного напряжения U_0 , возникающего под воздействием сигнала с давлением $P = 0,1 \text{ н/м}^2$ (1 дин/см^2)

$$N_{\text{ш}} = 20 \lg \frac{U_{\text{ш}}}{U_0}, \quad (44)$$

где $U_{\text{ш}}$ — напряжение шумов при отсутствии полезного сигнала. Напряжение шумов обусловлено главным образом тепловыми

шумами сопротивлений в электрической схеме микрофона. Величина шумового напряжения не зависит от чувствительности микрофона.

В микрофонах — приемниках давления — сила, действующая на подвижную систему (диафрагму), определяется звуковым давлением у поверхности диафрагмы. Устройство этих микрофонов таково, что звуковое поле может действовать только на одну сторону диафрагмы; другая конструктивно защищена от воздействия поля. Приемники давления на низких частотах не обладают направленным действием, их характеристика направленности изображается в виде окружности. С возрастанием частоты приемники давления становятся направленными, их характеристика направленности вытягивается в направлении оси микрофона. Чтобы уменьшить зависимость направленности действия от частоты, микрофоны этого типа конструктивно делают возможно малых размеров и обтекаемой формы.

Устройство микрофонов — приемников градиента давления — таково, что сила, действующая на подвижную систему, определяется разностью звуковых давлений на двух сторонах диафрагмы, для чего приемники этого типа выполняются так, что воздействию звукового поля подвергаются обе стороны диафрагмы. Характеристика направленности микрофонов — приемников градиента давления — имеет вид восьмерки. Приемник градиента давления обладает максимальной чувствительностью при падении звуковой волны в направлении оси микрофона, так как в этом случае максимальна разность давления по обе стороны диафрагмы. При направлении волны перпендикулярно к акустической оси микрофона чувствительность равна нулю, так как сила, действующая на диафрагму, равна нулю.

Односторонняя направленность достигается в микрофонах, называемых комбинированными приемниками. Первоначально такие приемники осуществлялись путем конструктивного объединения двух микрофонов — приемника давления и приемника градиента давления. Электрические цепи обоих микрофонов соединялись последовательно, в результате чего развиваемые им напряжения складывались. При этом характеристика направленности такой комбинации микрофонов приобретала вид кардиоиды. Односторонняя направленность комбинированного приемника физически объясняется тем, что при падении звуковой волны с фронта электрические сигналы, возникающие в обоих приемниках, совпадают по фазе и складываются, а при падении волны с тыла электрические сигналы противоположны по фазе и при равенстве уничтожаются. В современных микрофонах такой же результат достигается с одним приемником, в котором применяется такая механико-акустическая система, что сила, действующая на подвижную систему, складывается из двух составляющих, одна из которых не зависит от направления звуковой волны, а вторая зависит.

Устройство электродинамического микрофона в принципе такое же, как и электродинамического громкоговорителя. Только громкоговоритель излучает звук при пропускании электрического тока через звуковую катушку, а в микрофоне, наоборот, электрический ток генерируется в звуковой катушке при попадании звука на приемную диафрагму микрофона. Электродинамические микрофоны предназначены в основном для работы в звуковом диапазоне частот (до 12—15 кгц).

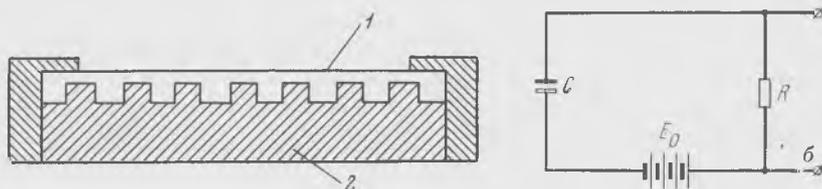


Рис. 15. Принцип устройства капсулы конденсаторного микрофона (а) и схема подключения поляризующего напряжения (б)

Принцип устройства капсулы конденсаторного микрофона — приемника давления — показан на рис. 15, а. Мембрана 1 в виде очень тонкой высокополимерной пленки, покрытой слоем электропроводящего материала, натянута и закреплена по краю. Расстояние между мембраной и массивным электродом 2 (не учитывая углублений в последнем) — $20 \div 30$ мк. Мембрана и массивный электрод образуют электрическую емкость C порядка 100 пф. К электродам подключается постоянное поляризующее напряжение E_0 (рис. 15, б) через большое сопротивление (порядка сотни мом). Звуковое поле воздействует на внешнюю сторону мембраны, смещает ее и в результате изменяется емкость между электродами. Это приводит к тому, что на сопротивлении R появляется переменная разность потенциалов, которую усиливают и регистрируют. Конденсаторные микрофоны, работающие как приемник давления, на низких частотах являются ненаправленными, однако с повышением частоты сигнала они становятся направленными. Более широкое применение получили конденсаторные микрофоны, работающие как комбинированные приемники. Конденсаторные микрофоны могут быть изготовлены более миниатюрными, чем электродинамические. Их рабочий диапазон частот может простирается до 100 кгц.

Некоторые микрофоны выпускаются с экранами для защиты от шумов обтекания воздушными потоками. На рис. 16 показана фотография такого экрана. Защита от шумов ветра бывает очень полезна при биоакустических измерениях в полевых условиях.

Особенно высоким качеством обладают конденсаторные микрофоны датской фирмы Brüel а. К.жг. Недостатком конденсатор-

Таблица 2

Тип микрофона	Направленность	Рабочий диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Выходной уровень в дБ относительно 1 мВт	Номинальное сопротивление нагрузки, Ом
ДМК	Ненаправленный	50—10000	6	—70	200 и 600
СДМ	То же	50—10000	12	—70	200 и 600
МД-35	» »	50—10000	8	—78	600
МД-38	» »	50—10000	8	—72	250
МЛ-4	» »	50—10000	3	—75	250
МЛ-10Б	» »	50—10000	5	—70	600
МЛ-15	Двусторонне направленный	50—10000	5	—75	250
МК-3	Односторонне направленный	40—15000	6	—66	250
КМ-57	То же	40—15000	5	—60	250
КИД-1 (19А-9)	» »	40—15000	6	—48	250 65 и 30

ных микрофонов по сравнению с электродинамическими является то, что для своей работы они требуют достаточно высокого поляризующего постоянного напряжения, кроме того они имеют



Рис. 16. Ветрозащитный экран

большое внутреннее сопротивление, что заставляет монтировать их в одном корпусе с предварительным усилителем.

В табл. 2 приведены параметры некоторых типов отечественных микрофонов.

3. Гидрофоны

Измерение звукового давления в воде имеет ряд особенностей по сравнению с измерениями в воздухе. Гидрофоны — приемники звука в воде — должны иметь малую зависимость чувствительности от гидростатического давления. Кроме того, следует учитывать то обстоятельство, что измерения в воде производят обычно в диапазоне частот, значительно более широком, чем в воздухе.

Лучше всего удовлетворяют требованиям независимости чувствительности от давления и температуры (при одновременном обеспечении широкого диапазона частот измерений) пьезоэлектрические гидрофоны. За последнее время широкое распространение получили гидрофоны на основе пьезокерамики, в основном сферические и цилиндрические.

Сферические пьезоэлектрические гидрофоны

Конструктивно сферические приемные пьезоэлементы крупных размеров (10—50 мм) изготавливают так же, как и излучающие (см. рис. 11).

На рис. 17 приведены характеристики направленности в экваториальной (*a*) и меридиональной (*б*) плоскостях гидрофона с жестким креплением чувствительного элемента. Внешний диаметр сферы в этом случае 15 мм. Как и следовало ожидать, характеристика направленности в меридиональной плоскости сильно искажена держателем сферы.

Чувствительность сферических гидрофонов из пьезокерамики определяется следующей приближенной формулой (Клюкин,

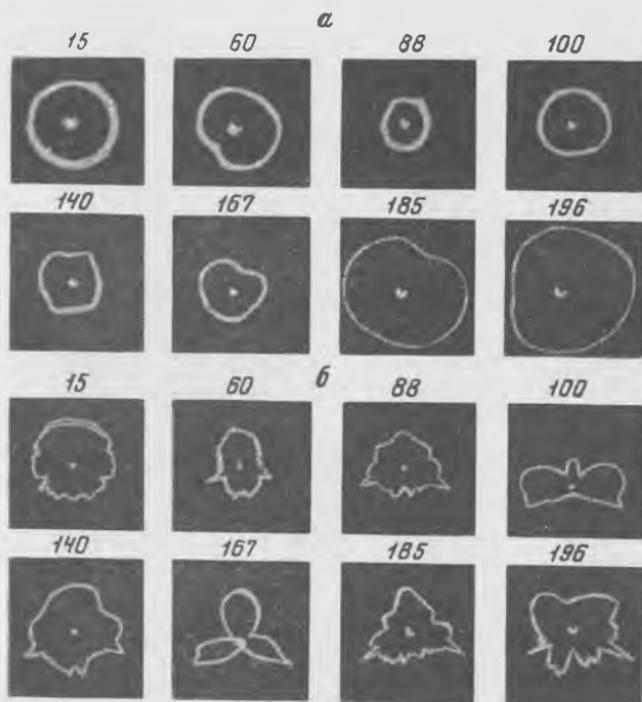


Рис. 17. Характеристики направленности сферического гидрофона в экваториальной (*a*) и меридиональной (*б*) плоскостях на различных частотах (в кгц)

Колесников, 1968):

$$M = \frac{d_{31}D \left[d \left(1 - \frac{d_{33}}{d_{31}} \right) - D \right]}{2(D - 2d)\epsilon} \quad (44a)$$

Как видно из формулы (44а), толщина стенок сферы мало влияет на значение чувствительности, определяющейся главным образом диаметром сферы, диэлектрической постоянной и пьезомодулем. Точное значение чувствительности гидрофонов, учитывая технологический разброс параметров материалов, влияние амплитуды и т. д., обычно определяется экспериментально путем градуировки. Применительно к пьезокерамике промышленного типа (BaTiO_3) формула для чувствительности приобретает простой вид:

$$M = 2200D \left(\frac{D - 3,5d}{D - 2d} \right) \text{ мкВ/н/м}^2, \quad (45)$$

где D и d даны в метрах.

В случае применения пьезокерамики ЦТС-19 чувствительность сферического гидрофона примерно в два раза выше, чем гидрофона из керамики BaTiO_3 .

Формула (44а) действительна на частотах ниже частоты первого радиального резонанса, определяемого соотношением

$$f \simeq \frac{1,1 \cdot 10^3}{D - 2d} \text{ гц.} \quad (46)$$

При решении некоторых задач биоакустики возникает необходимость в миниатюризации сферических гидрофонов. В частности, при регистрации звуков в непосредственной близости от источника, при моделировании некоторых биоакустических процессов, а также при изучении высокочастотных составляющих сигнала могут быть рекомендованы сверхминиатюрные широкополосные сферические гидрофоны (Романенко, 1957).

На рис. 18 схематически изображена конструкция сверхминиатюрного сферического гидрофона. Чувствительный элемент гидрофона (1) выполнен в виде сферического слоя из керамики титаната бария толщиной около 0,05 мм, нанесенного на платиновый шарик (2), оплавленный на конце платиновой проволоки (3) диаметром 0,05 мм. Проволока проходит внутри стеклянного капилляра (4), в торец которого на одну треть вплавлен шарик. Капилляр является продолжением стеклянной трубки (5), которая служит держателем и коаксиальным выводом. На внешнюю поверхность трубки, капилляра и керамического слоя нанесен слой серебра являющийся электродом (6). Трубка заканчивается переходным патроном (7), предназначенным для присоединения гидрофона к предварительному усилителю. Отличительной чертой конструкции этого гидрофона является то, что пьезоэлемент изготавливают не отдельно, а спекают непосредственно на внутреннем электродном слое.

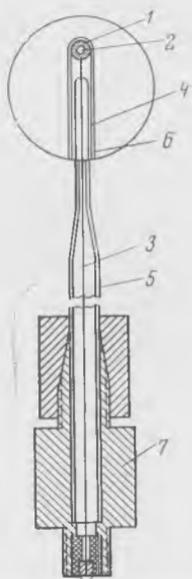


Рис. 18. Конструкция сверхминиатюрного сферического гидрофона

троде. Материалом для внутреннего электрода выбрана платина потому, что она, во-первых, способна выдерживать температуру спекания титаната бария (1380°), во-вторых, не окисляется при этой температуре и практически не реагирует с титанатом бария, в-третьих, обладает сравнительно малым удельным сопротивлением, что важно при малой толщине проволоки. Емкость гидрофона, равная сумме емкостей пьезоэлемента и коаксиального вывода, составляет около 20 пф, причем емкость коаксиального вывода равна примерно 5 пф. Чувствительность гидрофона порядка $0,001-0,01$ мкв/бар. Указанным выше способом могут быть изготовлены гидрофоны с размером чувствительного элемента около $0,1-0,2$ мм. Изготовление чувствительного элемента с размером, большим указанного, путем простого увеличения диаметра платинового шарика и толщины слоя керамики оказалось невозможным ввиду того, что слой керамики после спекания растрескивался в результате усадки.

Для увеличения диаметра чувствительного элемента между платиновым электродом и спеченным керамическим титанатом бария пришлось расположить слой пористой керамики, который, деформируясь, компенсирует усадку внешнего плотного слоя керамики. Конструкция чувствительного элемента с пористым слоем аналогична конструкции чувствительного элемента, показанного на рис. 18, за исключением того, что между платиновым шариком и слоем плотной керамики нанесен слой пористой

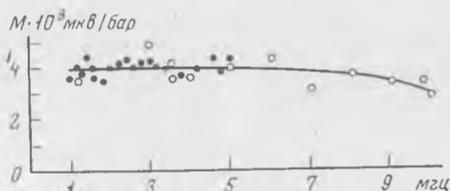


Рис. 19. Частотная характеристика сверхминиатюрного гидрофона с размером чувствительного элемента $0,20$ мм

керамики. Технология создания пористого слоя подробно изложена в работе (Романенко, 1967). Использование пористого переходного слоя позволяет изготовить гидрофоны с чувствительным элементом, имеющим размеры до 3 мм. Чувствительность их на порядок больше, чем у описанных выше сверхминиатюрных гидрофонов, полоса принимаемых частот — до $0,8-3$ мГц. На рис. 19

приведена частотная характеристика чувствительности сверхминиатюрного гидрофона с размером чувствительного элемента 0,20 мм.

Цилиндрические пьезоэлектрические гидрофоны

Чувствительные элементы цилиндрических гидрофонов диаметром 10—50 мм ничем не отличаются от цилиндрических излучателей, описанных на стр. 28. Формула для расчета чувствительности цилиндрического гидрофона из пьезокерамики имеет вид:

$$M = \frac{d_{31} \left[1 + \frac{d}{D-d} \left(\frac{d_{33}}{d_{31}} \right) \right] D}{2\varepsilon} \quad (47)$$

Для промышленной керамики титаната бария

$$M = 2200 \left(1 - \frac{2,5d}{D-d} \right) D \text{ мкв/н/м}^2. \quad (48)$$

Как и в предыдущем случае, чувствительность пьезоцилиндра из ЦТС-19 примерно в два раза выше, чем при использовании керамики титаната бария.

До настоящего времени нет полного теоретического решения задачи о спектре резонансных частот цилиндрической оболочки конечной длины с произвольной толщиной стенки. Поэтому нет возможности привести расчетную формулу частоты первого резонанса пьезоцилиндра.

В табл. 3 приведены параметры ряда цилиндрических гидрофонов, определенные экспериментальным путем, в том числе и их резонансные частоты.

Конструктивно цилиндрические гидрофоны крупных размеров (больше 6 мм) иногда монтируются способом, который показан на рис. 20 (Ананьева, 1963). Здесь использован цилиндрический

Таблица 3

Цилиндр, мм			Емкость, пф	Статическая чувствительность, мкв/н/м ²	Частота первого резонанса, кГц
наружный диаметр	высота	толщина стенки			
52	40	3,0	15000	84	20
30	30	1,5	23000	70	50
15	12	1,0	4500	30	100
10	10	1,0	3000	20	150
8	8	0,5	3500	—	—
6	6	0,5	1000	8	200

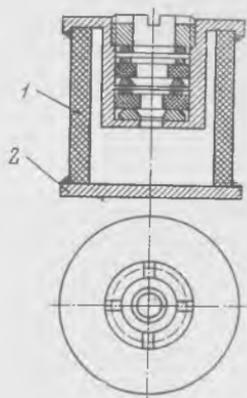


Рис. 20. Цилиндрический гидрофон с размером чувствительного элемента больше 6 мм

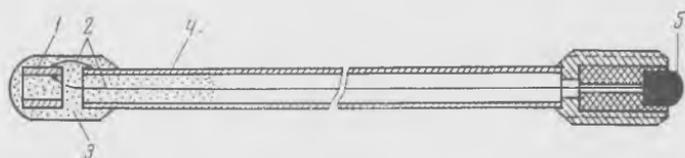


Рис. 21. Простая конструкция цилиндрического гидрофона

радиально поляризованный чувствительный элемент (1), торцы которого закрыты жесткими пластинами (2) (металлическими или керамическими), воспринимающими звуковое давление. В одной из торцевых пластин имеется отверстие для ввода кабеля, которое герметизировано сальником, расположенным во внутренней полости гидрофона. Что касается характеристик направленности таких гидрофонов, то они подобны характеристикам направленности сферических гидрофонов, однако их неравномерность в плоскости держателя выражена сильнее ввиду отсутствия сферической симметрии самого чувствительного элемента в этой плоскости. Описанные цилиндрические гидрофоны достаточно крупных размеров, так же как и сферические, находят широкое применение при изучении дальнего акустического поля китообразных, ластоногих рыб. При изучении ближнего акустического поля животных лучше

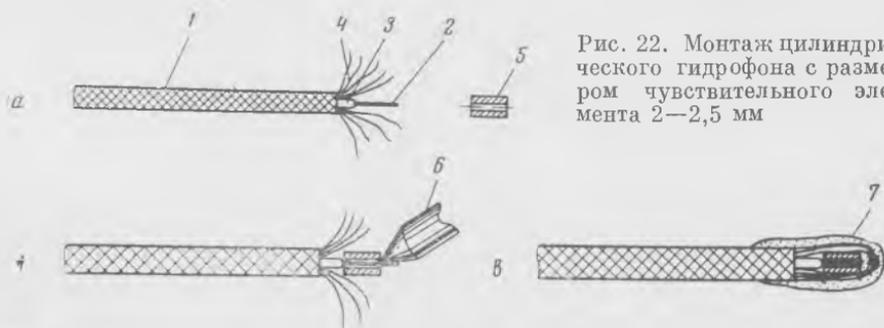


Рис. 22. Монтаж цилиндрического гидрофона с размером чувствительного элемента 2—2,5 мм



Рис. 23. Гидрофон

использовать миниатюрные цилиндрические (или сферические) гидрофоны.

Одна из простейших конструкций цилиндрического гидрофона с диаметром пьезоцилиндра 2—3 мм показана на рис. 21 (Романенко, 1967). Полый цилиндр (1) из керамики титаната бария (или ЦТС-19) с серебряными электродами, нанесенными на внутреннюю и наружную поверхности цилиндра, с помощью проводников (2) соединяется с внутренним и наружным проводниками коаксиального держателя (4). Цилиндр укрепляют на торце металлической трубки с помощью замазки (3) из сплава воска и канифоли, для чего смонтированный гидрофон опускают в пробирку с расплавом замазки. Замазка, кроме того, является хорошей акустической развязкой пьезоэлемента от держателя. С помощью соединительного патрона (5) гидрофон присоединяют к усилителю.

В последние годы в биоакустических исследованиях дельфинов успешно применялись миниатюрные цилиндрические гидрофоны еще более простой конструкции (Романенко и др., 1974). Чувствительный цилиндрический пьезоэлемент из керамики ЦТС диаметром 2—2,5 мм монтируют непосредственно на конце тонкого экранированного провода без специального держателя. На рис. 22 показана в деталях схема монтажа. Экранированный провод (рис. 22, а) с наружным диаметром 1—2 мм (1) разделяют на конце так, чтобы оголенная центральная жила (2) выступала на 7—10 мм, изоляция (3) — на 1—2 мм, а экран расплетают настолько, чтобы отдельные проволоочки экрана имели длину 10—12 мм. После этого центральную жилу провода облуживают низко-

температурным припоем настолько, чтобы ее диаметр увеличился до внутреннего диаметра пьезоцилиндра (5). Затем пьезоцилиндр надвигают (рис. 22, б) на центральную жилу до упора в изоляцию, и выступающий конец центральной жилы прогревают жалом электропаяльника настолько, чтобы внутренний серебряный электрод пьезоцилиндра припаялся к центральной жиле. Выступающий из пьезоцилиндра конец центральной жилы отрезают, а проволочки расплетенного экрана загибают около пьезоцилиндра так, как показано на рис. 22, в, концы их сводят вместе и пропаивают паяльником. Готовый гидрофон опускают в пробирку с расплавом воска и канифоли, который пропитывает конструкцию и заполняет все полости (7). Такой гидрофон прочен, хорошо гидроизолирован и экранирован от электрических помех. Прогревание пьезоцилиндра при монтаже практически не уменьшает его чувствительность, так как керамика ЦТС имеет высокотемпературную точку Кюри.

На рис. 23 приведена фотография такого гидрофона. Диаметр использованного экранированного провода 1,2 мм. Размеры пьезоцилиндра (в мм): диаметр 2, высота 2. Чувствительность такого гидрофона около 0,1 мкв/бар.

Плоские пьезоэлектрические гидрофоны

Чувствительность описанных сферических и цилиндрических гидрофонов невысока — в лучшем случае порядка 10 мкв/н/м². Такие гидрофоны с успехом можно применять для приема достаточно интенсивных и широкополосных биоакустических сигналов, например сигналов дельфинов, уровень которых может достигать 140—150 дб относительно $2 \cdot 10^{-4}$ дин/см². Однако для приема звуков рыб такие гидрофоны мало пригодны, так как уровень их звуков составляет в лучшем случае всего 100—120 дб.

Для приема сравнительно слабых биоакустических сигналов под водой разработаны два варианта чувствительного плоского гидрофона с механической трансформацией звукового давления, к описанию которых мы переходим (Романенко, 1967).

Сущность первого варианта механической трансформации звукового давления может быть пояснена на следующем простейшем примере (рис. 24). Пусть звуковое давление P принимается пластинкой (1) с поверхностью S_1 . Сила, с которой плоская звуковая волна действует на поверхность S_1 при нормальном падении на нее, равна произведению $P \cdot S_1$. Если пластинка S_1 опирается на миниатюрный чувствительный элемент (2), имеющий поперечное сечение S_2 , то вся сила $P S_1$ распределится по поверхности S_2 , и давление на чувствительном элементе будет во столько раз больше звукового давления, во сколько раз поверхность S_1 больше поверхности S_2 . В описанных ранее сферических и цилиндрических гидрофонах также использован принцип механической

трансформации давления. Однако там коэффициент трансформации не превышает десятков, в лучшем случае сотен. Если приемная диафрагма плоская, опирающаяся на чувствительный элемент малого размера, как показано на рис. 24, коэффициент трансформации может достигать нескольких тысяч. Гидрофоны с такой трансформацией давления широкополосны в диапазоне частот от единиц герц до десятков килогерц и их чувствительность порядка $100 \div 1000$ мкв/н/м². Отдельные экземпляры приемников, пред-

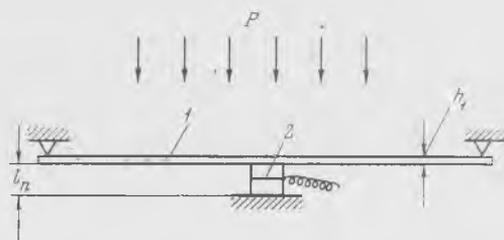


Рис. 24. Схема механической трансформации (первый вариант)

назначенные для работы в диапазоне низких звуковых частот, имеют чувствительность около $100\,000$ мкв/н/м².

В случае опертой приемной пластинки коэффициент трансформации определяется соотношением

$$K = \frac{0,59r^4 E_2 (5 + \nu) (1 - \nu)}{l_p E_1 h_1^3 + 0,75 S_2 r^2 (3 + \nu) (1 - \nu)}, \quad \text{при } h_1 \ll r. \quad (49)$$

Здесь r , h_1 , E_1 и ν — радиус, толщина, модуль Юнга и коэффициент Пуассона приемной пластинки соответственно; l_p , S_2 , E_2 — толщина, площадь сечения и модуль Юнга материала пьезоэлемента соответственно. При условии $h_1 \rightarrow 0$ формула упрощается:

$$K = 0,8 \frac{(5 + \nu) r^2}{(3 + \nu) S_2}. \quad (50)$$

Если приемная пластинка закреплена, то формула для коэффициента трансформации принимает вид:

$$K = \frac{0,59 (1 + \nu) E_2 r^2 [r^2 (1 - \nu) + 4h^2]}{\pi l_2 E_1 h_1^3 + 0,76 S_2 E_2 (1 - \nu^2) \cdot A}, \quad (51)$$

где

$$A = r^2 + \frac{2h_1^2}{1 + \nu} \ln \frac{r}{2,5h_1} - \frac{2\nu h_1^2 [r^2 - (2,5h_1)^2]}{r^2 (1 + \nu)^2} + 0,81 (2,5h_1)^2. \quad (52)$$

Если можно считать, что $h_1 \rightarrow 0$ по сравнению с r , то формула (51) также становится много проще

$$K \approx \frac{0,8r^2}{S_2}. \quad (53)$$

Частоту первого резонанса гидрофона в случае опертой приемной пластинки с достаточной точностью определяют по формуле

$$f = \frac{\alpha^2}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{gD}{\rho h_1}}, \quad (54)$$

где $\alpha = 3,8$; g — ускорение силы тяжести; ρ — плотность материала пластинки; D — цилиндрическая жесткость пластинки, равная

$$D = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \nu^2)}. \quad (55)$$

При заземленной пластинке первый резонанс будет несколько выше.

Конструкция пьезоэлемента показана на рис. 25. В качестве материала пьезоэлемента выбран сульфат лития, обладающий высоким значением пьезоконстанты давления. Пьезоэлемент состоит из двух квадратных пластинок (1) и (2) сульфата лития размером $0,5 \text{ см} \times 0,5 \text{ см} \times 0,13 \text{ см}$, склеенных так, что векторы поляризации направлены навстречу друг другу. Electroдами пьезоэлемента служат стальные пластинки (3—5) толщиной $0,08 \text{ мм}$, приклеенные к пьезоэлементу. Электрод (4) является общим. Electroды (3) и (5) электрически закорочены. Таким образом, обе пластинки пьезоэлемента работают параллельно. Пьезоэлемент центральным электродом присоединяют ко входу катодного повторителя, вмонтированного в корпус гидрофона. Конструктивно гидрофон выполнен в виде корпуса (1) (рис. 26) с выфрезерованным углублением для монтажа катодного повторителя, приемной пластинки (2) и прижимного кольца (3). Приемная пластинка может

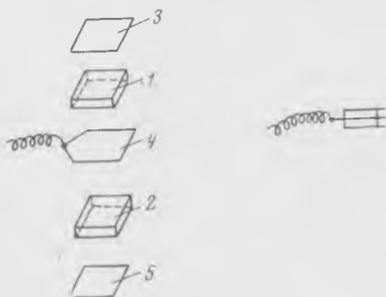


Рис. 25. Конструкция пьезоэлемента

быть выполнена заодно с кольцом в виде навинчивающейся крышки. В этом случае пластинка работает как заземленная. Пьезоэлемент (4) слегка зажимают с помощью кольца между корпусом и приемной пластинкой. Питание катодного повторителя осуществляют с помощью кабеля (5) от постороннего источника (на рисунке не показан). По этому же кабелю электрический сигнал с выхода катодного повторителя подают к регистрирующей аппаратуре.

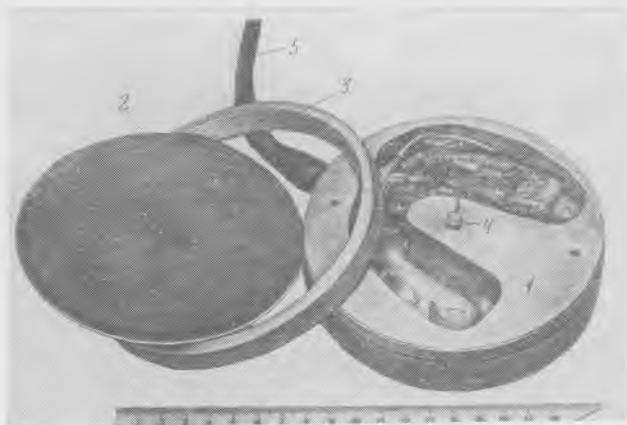


Рис. 26. Конструкция гидрофона (первый вариант)

На рис. 27 показана схема катодного повторителя, специально предназначенная для работы от пьезоэлемента. Катодный повторитель надежно работает при анодном напряжении 10—15 в и имеет коэффициент передачи $k = 0,82$.

Чувствительность гидрофона описанной конструкции с достаточной точностью может быть рассчитана по формуле:

$$\frac{U}{P} = \frac{4\pi d}{\epsilon} \cdot k \cdot \frac{l_2}{2} \cdot C_{\text{п}} K \frac{\omega R}{\sqrt{\omega^2 R^2 (C_{\text{м}} + C_{\text{п}})^2 + 1}} \text{ мкв/н/м}^2, \quad (56)$$

d , ϵ и $C_{\text{п}}$ — пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость и емкость пьезоэлемента соответственно; R — утечка сетки катодного повторителя; $C_{\text{м}}$ — входная емкость катодного повторителя; $\omega = 2\pi f$; f — частота.

Принцип действия второго варианта гидрофона показан на рис. 28. Звуковое давление P принимается опертой (или заземленной) по краю пластинкой (1) и трансформируется в давление на переходный выступ (2) стального прямоугольного бруска (3) с выфрезерованными углублениями (4 и 5). Брусок концами оперт на корпус гидрофона. В углубление (4) вкладывают две пьезоэлектрические пластинки так, чтобы векторы поляризации были направлены навстречу друг другу. В этом случае пьезоэлементы, как и в первом варианте, работают параллельно. Вывод от общего электрода присоединяют ко входу катодного повторителя. В углубление (5) вкладывают стальную пластинку, слегка изогнутую по дуге (см. рис. 28) и нажатием сверху впрессовывают в углубление. Выпрямляясь, пластинка удлиняется и через переходной выступ запрессовывает пьезоэлементы. Запрессовка пьезоэлементов необходима для того, чтобы обеспечить хороший механический контакт с бруском.

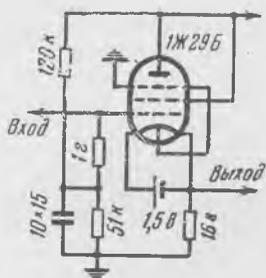
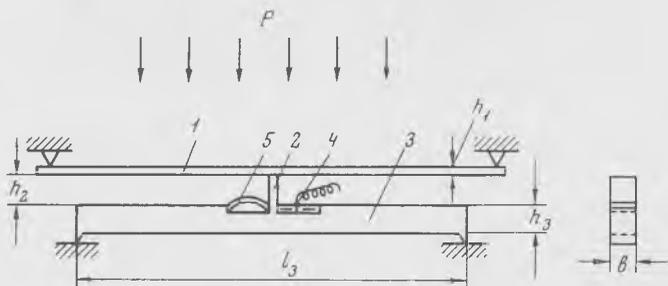


Рис. 27. Схема катодного повторителя

Рис. 28. Второй вариант гидрофона



Давление, трансформированное с приемной пластинки 1 на переходный выступ 2, прогибает брусок 3, что приводит к появлению внутренних напряжений в бруске, которые максимальны вблизи того места, где впрессованы пьезоэлементы, и существенно превышают вызвавшее их давление со стороны выступа 2. Так осуществляется вторая трансформация давления. Первой мы называем трансформацию давления с приемной пластинки 1 на выступ 2. Общий коэффициент трансформации равен произведению первого и второго коэффициентов и может достигать величины в несколько тысяч. Формула для расчета общего коэффициента трансформации в случае опертой пластинки имеет вид:

$$K = \frac{9r^4 l_3 (5 + \nu) (1 - \nu)}{32E_1 b h_1^3 h_3^2 \left[\frac{l_2}{S_2 E_2} + \frac{3r^2 (3 + \nu) (1 - \nu)}{4\pi E_1 h_1^3} + \frac{l_3^3}{4E_3 b h_3^3} \right]} \quad (57)$$

при $h_1 \ll r$. Здесь по-прежнему r , h_1 , E_1 и ν — параметры приемной пластинки; l_2 , E_2 , S_2 — высота, модуль Юнга и площадь поперечного сечения переходного выступа; l_3 , h_3 , b и E_3 — длина, высота, ширина и модуль Юнга материала бруска.

Первая резонансная частота системы в случае опертой по краю приемной пластинки с достаточной точностью может быть определена по той же формуле (54) при $\alpha = 2,22$. Однако при этом необходимо учитывать, что положение первого резонанса самого

бруска определяется формулой

$$f = \frac{\alpha^2}{2\pi l_3^2} \sqrt{\frac{gE_3 J}{\gamma b h_3}}, \quad (58)$$

где

$$J = \frac{bh_3^3}{12}, \quad \alpha = \frac{\pi}{2}.$$

Чувствительность приемника рассчитывают по формуле (56). Конструктивное выполнение гидрофона такое же, как и в первом варианте. Разница состоит лишь в том, что вместо пьезоэлемента, показанного на рис. 26, между приемной пластинкой и корпусом зажимают брусок.

Гидрофоны описанной конструкции предназначены для работы как в воздухе, так и в воде. В последнем случае лишь необходимо герметизировать их. Простейший способ герметизации может быть предложен следующий. Резьбу можно герметизировать замазкой, состоящей из смеси воска и канифоли в произвольной пропорции (лучше 1 : 1), наносимой на резьбу перед завинчиванием. При этом корпус и прижимное кольцо (или крышку) необходимо прогреть до 60—70°. На наружную поверхность приемной пластинки и кольца следует наклеить тонкую резину, чтобы она закрыла доступ воде в возможный зазор между пластинкой и кольцом. Резина толщиной 0,5 мм несущественно изменяет параметры гидрофона.

При расчете резонансной частоты гидрофона, предназначенного для работы в воде, необходимо учитывать присоединенную массу воды, которая понижает резонансную частоту.

При работе гидрофонов в звуковом диапазоне частот они могут быть использованы в комплекте с портативными магнитофонами. Такой комплект очень удобен в работе и позволяет записывать звуки как в воздухе, так и в воде. В этом случае гидрофон подключают непосредственно ко входу магнитофона. Малогабаритный источник питания гидрофона монтируют в магнитофоне.

Наряду с миниатюрными сферическими и цилиндрическими гидрофонами в биоакустических исследованиях нашли применение и миниатюрные плоские гидрофоны. Диркс и соавторы (Diercks a. oth., 1971) использовали плоские пьезоэлементы, смонтированные в резиновые присоски для регистрации звуков дельфинов непосредственно у источника — на лобном выступе. В наших исследованиях также нашли применение миниатюрные гидрофоны, смонтированные в резиновые присоски. Технология изготовления таких гидрофонов при наличии миниатюрных пьезопластинок из керамики ЦТС очень проста. На рис. 29 показана конструкция такого гидрофона в процессе сборки. В обычной резиновой присоске (1) делают выборку (2) по диаметру имеющейся пьезопластины и отверстие (3), в которое пропускают тонкий экранированный провод (4). Конец провода разделяют так,

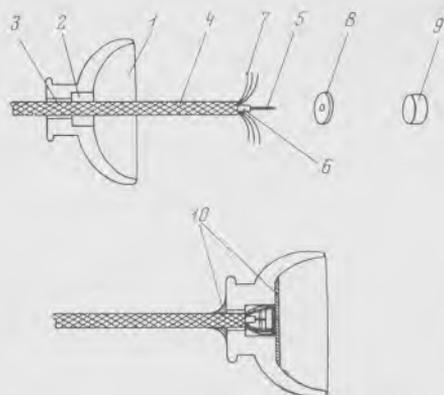


Рис. 29. Монтаж миниатюрного плоского пьезоэлектрического гидрофона в присоске

Рис. 30. Гидрофон

чтобы центральная жила (5) выступала на 4—5 мм, изоляция (6)—на 1—2 мм, а экран расплетают так, чтобы проволоочки экрана (7) имели длину 10—12 мм. Резиновый кружок (8) толщиной 1 мм с отверстием в центре по диаметру жилы провода надвигают на жилу до упора в изоляцию. Центральную жилу провода припаивают к одному из электродов пьезопластины (9) в его центре, а проволоочки экрана загибают по образующей пластинки и припаивают к другому ее электроду, образуя экран. Всю конструкцию

Таблица 4

Материал	Плотность, кг/м ³	Предельная рабочая температура, °С	Пьезомодуль, к/н·10 ¹²	Диэлектрическая проницаемость	Примечание
Кварц	2650	300	$d_{11} = 2,3$	$\epsilon_{11} = 4,5$	$\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{12}$
Турмалин	3100	—	$d_{33} = 1,8$	$\epsilon_{33} = 7,5$	
Сульфат лития	2050	90	$d_{22} = -15$	$\epsilon_{22} = 10,3$	Гигроскопичен
Сегнетова соль	1778	30	$d_{14} = 2300$	$\epsilon = 200$	Гигроскопична
Дигидрофосфат аммония (АДР)	1880	100	$d_{36} = 49$	$\epsilon_{33} = 14$	
Тартрат калия	1987	80	$d_{22} = 2,8$	$\epsilon_{22} = 5,8$	
Промышленная пьезокерамика	5500	80	$d_{33} = 120$	$\epsilon = 1200$	
ЦТС-19	7300	300	$d_{31} = -47$ $d_{33} = 260$	$\epsilon = 1500$	

в сборке пропитывают клеем 88 или резиновым и втягивают в углубление (2) присоски (1). Клей заполняет все пустоты (10) конструкции и зазоры в присоске, застывает, придавая конструкции монолитность при одновременном сохранении эластичности.

На рис. 30 показана фотография такого гидрофона. Диаметр экранированного провода 1,2 мм, диаметр пьезопластики 5 мм, толщина 3 мм, диаметр присоски 30 мм. Чувствительность гидрофона — около 1 мкв/бар.

В описанных выше гидрофонах в качестве активного чувствительного материала использована пьезокерамика и сульфат лития. Существуют и другие пьезоматериалы, которые могут быть использованы при конструировании гидрофонов. В табл. 4 приведены основные параметры некоторых пьезоматериалов.

Электрохимические гидрофоны

Помимо описанных выше пьезоэлектрических гидрофонов есть еще один обширный класс приборов, которые пока еще не нашли широкого применения в биоакустике, но могут быть отнесены к весьма перспективным разработкам. Речь идет об электрохимических гидрофонах. Прежде всего это солион (Yeager, 1955; Новиков, Новицкий, 1968). Слово «солион» происходит от фразы «ions in solution» — ионы в растворе. Уже в самом названии этого типа электрохимических звукоприемников отражен принцип их работы, который заключается в переносе электрических зарядов с помощью ионов, а подвижность последних определяется колебательным давлением в звуковой волне. На рис. 31 показан принцип конструкции солиона. Корпус (1) солиона сделан из инертного материала типа пластмасс. Внутренний объем разделен на две части перегородкой (2) из того же материала. В перегородку вставляют металлическое кольцо или пластинку (3) с отверстием, сквозь которое обе части солиона сообщаются друг с другом. Боковые стороны закрыты инертными упругими мембранами (4). Внутренний объем солиона заполнен электролитом, содержащим ионы окисленной и восстановленной форм (например, ионы иодина J_2 и иодида J^-), причем концентрация окисленной формы (иодин J_2) должна быть много меньше ($\sim 10^{-2}N$) концентрации восстановленной формы ($\sim 0,5 N$). Высокая концентрация иодида достигается растворением соли KJ , которая полностью диссоциирует. В электролит погружены электроды — два анода (5) и катод (3), изготовленные из металла, не реагирующего с электролитом (лучше всего платина), аноды выполняют обычно в виде сеток, а катод — в виде кольца или пластинки с отверстием, сквозь которое сообщаются левая и правая полости солиона. К электродам прикладывают постоянное напряжение величиной $0,1 \div 0,9$ в, так, как указано на рис. 31. В этом интервале напряжений ток через солион не зависит от напряжения. Измерительный прибор (6) измеряет ток, протекающий в цепи. В отсутствие звука элек-

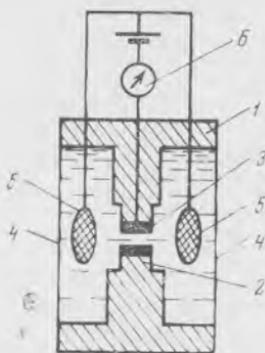


Рис. 31. Конструкция солиона

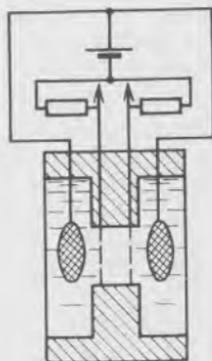
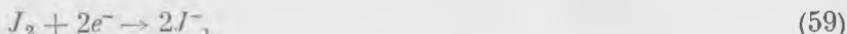
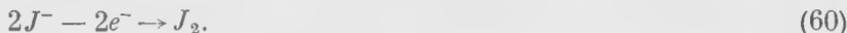


Рис. 32. Конструкция линейного солиона

тролит в солионе покоится, и во внешней цепи устанавливается электрический ток, определяемый процессами диффузии главным образом ионов окисленной формы к катоду. В этом случае на катоде происходит восстановление ионов иодина по реакции



а на аноде — окисление ионов иодида



Предельный ток i имеет величину

$$i = \frac{AD}{e} FN, \quad (61)$$

где A — эффективная поверхность катода; N — концентрация иодина; e — эффективная толщина диффузионного слоя; F — постоянная Фарадея; D — коэффициент диффузии. Обычно предельный ток не превышает нескольких микроампер. При наличии звука между мембранами солиона появляется разность давления Δp , которая заставляет электролит перетекать из одной полости солиона в другую через отверстие катода, что приводит к усиленному конвективному подводу к катоду реагирующих на нем ионов окисленной формы и, следовательно, к возрастанию электрического тока. Величина тока при этом определяется не только разностью давления Δp , но и формой катода и может быть представлена выражением

$$i = k(\Delta P)^n, \quad (62)$$

или

$$i = k \cdot \lg(\Delta P), \quad (63)$$

где n и k зависят от геометрии катода.

Для измерительных целей интерес представляет, прежде всего, линейный звукоприемник, у которого выходной сигнал линейно зависел бы от давления и его знак соответствовал бы знаку давления. Схема такого солиона показана на рис. 32. В отличие от предыдущей схемы солиона здесь имеется два катода, установленных в перегородке и включенных по дифференциальной схеме. На каждом из таких катодов должен восстанавливаться весь иодин, прибывший с потоком. Это является одним из основных условий линейности звукоприемника. В этом случае электрический ток определяется соотношением

$$i = FN \frac{\Delta P}{Z} \cdot 10^{-3}, \quad (64)$$

где Z — акустическое сопротивление отверстия катода, не зависящее в данном случае от давления.

В реальных конструкциях солионов могут быть использованы не только ионы иодида, но и другие. Однако они должны обязательно представлять собой обратимую окислительно-восстановительную систему. Такими системами могут быть: иодин — триодид, феррицианид — ферроцианид, бромин — бромид и некоторые другие. Солионы имеют ряд преимуществ перед другими типами звукоприемников: 1) высокую чувствительность, 2) низкий порог чувствительности, 3) широкую полосу в области низких частот, 4) умеренный температурный коэффициент, который может быть скомпенсирован термистором, 5) хорошую стабильность и надежность, 6) малую потребляемую мощность, 7) сравнительно небольшое внутреннее сопротивление (порядка 0,1—1 мгом).

Основной недостаток солионов в том, что они эффективно работают лишь в диапазоне инфразвуковых частот.

Ниже приводятся параметры одного из реальных солионов:

Чувствительность, мка/н/м ²	—10
Динамический диапазон, н/м ²	—0,1—300
Частотный диапазон (по уровню 3 дб), гц	—0,001—0,3
Диаметр солиона, мм	—32
Длина, мм	—45
Вес, г	—50
Температурный коэффициент чувствительности, % на 1°	—+2,5

Для измерения малых акустических давлений (порядка 10^{-4} — 10^{-1} н/м²) в диапазоне частот 1—50 гц может быть использован солион с сетчатым катодом, перекрывающим отверстие в центральной перегородке. Принцип действия этого звукоприемника состоит в выделении малого переменного электрического сигнала, вызванного внешним акустическим воздействием, на уровне сравнительно большого тока фона (200 ÷ 500 мка). Чувствительность подобного звукоприемника достигает 500 мка/н/м². Внутреннее сопротивление его составляет приблизительно 1 ком.

Описанные звукоприемники целесообразно применять в качестве чувствительных элементов гидрофонов, микробарографов, сейсмографов и т. п. По точности, линейности и стабильности они пока уступают емкостным и пьезоэлектрическим приемникам, но малые габариты и вес, простота устройства и схемы электрического питания, ничтожно малая величина потребляемой энергии (десятки микроватт), высокая чувствительность делают их конкурентоспособными типами преобразователей в некоторых областях автоматики и измерительной техники, например для создания малогабаритных станций по комплексному исследованию геофизических явлений на суше и море (параметров гидродинамического, акустического, сейсмического и температурного полей).

Помимо солиона для биоакустических измерений может быть рекомендован еще один гидрофон электрохимического типа. Этот гидрофон основан на U -эффекте, названном так по начальной букве фамилии исследователя, изучавшего его (Ueda a. oth., 1950). Этот эффект состоит в следующем (рис. 33). В капилляре (1) находится ртуть (2) в виде отдельных участков и электролит (3) в промежутках между участками ртути. Все процессы в этом гидрофоне развиваются на поверхностях раздела ртути и электролита и заключаются в изменении электрической емкости границы раздела под действием звука. При постоянном электрическом заряде, изменения величины емкости приводят к появлению переменного потенциала на выходе гидрофона (на электродах 4). Эффект аддитивен относительно каждой поверхности раздела. Он изучен на частотах от 0,5 до 13,5 кгц при наличии в гидрофоне примерно 40 поверхностей раздела. При этом электролитом служила серная кислота 0,5 молярной концентрации.

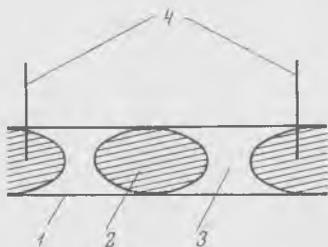


Рис. 33. Схема, поясняющая принцип действия гидрофона, основанного на U -эффекте

Этот эффект уже применялся в биоакустике. В частности, гидрофон, сконструированный на его основе, оказался более чувствительным, чем сегнетоэлектрический: он позволил регистрировать звуки стаи рыб на расстоянии до 3 км, тогда как гидрофон из сегнетовой соли позволил регистрировать те же звуки на расстоянии только 1,5 км.

ГРАДУИРОВКА МИКРОФОНОВ И ГИДРОФОНОВ

В акустике вообще и в биоакустике в частности существуют два термина, которые иногда ошибочно считают синонимами. Речь идет о «градуировке» и «калибровке» измерительных приборов. Градуировка — это такая измерительная процедура, в результате которой получают численные значения, характеризующие определенное качество прибора (чувствительность, коэффициент усиления и т. п.). Предполагается, что ранее эти значения были не известны. Калибровка — это процедура, устанавливающая соответствие данного прибора своим номинальным параметрам или паспортным данным, определенным ранее с помощью градуировки. Градуировку производят сравнительно редко, тогда как калибровку рекомендуется выполнять неоднократно в процессе измерений.

Мы рассмотрим несколько методов абсолютной градуировки микрофонов и гидрофонов, цель которой — определить значение их чувствительности. Здесь имеется в виду чувствительность, определяемая отношением U/P , где U — электрическое напряжение на выходе гидрофона, обусловленное звуковым давлением P волны. Вообще говоря, более полную характеристику гидрофона дает так называемая удельная чувствительность, определяемая как $U/P \cdot 1/Z$, где Z — импеданс гидрофона. Дело в том, что гидрофон является преобразователем акустической энергии в электрическую, и коэффициент преобразования равен отношению электрической энергии на выходе гидрофона к энергии звукового поля:

$$K = \frac{U^2}{Z} \cdot \frac{\rho c}{P^2} \quad (65)$$

Из этой формулы видно, что качество гидрофона как преобразователя определяется не только отношением U/P , но и соотношением импеданса гидрофона Z и акустического сопротивления среды ρc . Однако общепринято характеризовать гидрофон чувствительностью в виде отношения U/P . Следует различать чувствительность по полю и чувствительность по давлению. Чувствительность по полю определяется отношением электрического напряжения, развиваемого гидрофоном, помещенным в некоторую точку

звукового поля, к тому звуковому давлению, которое существовало бы в той же точке поля при отсутствии гидрофона. Чувствительность по давлению — это отношение электрического напряжения, развиваемого гидрофоном, к звуковому давлению на гидрофоне. Чувствительность по полю совпадает с чувствительностью по давлению на тех частотах, на которых можно пренебречь дифракцией звука на гидрофоне. Это имеет место в случае, когда размеры гидрофона много меньше длины звуковой волны. Если же такое условие не выполняется, то чувствительность по давлению отличается от чувствительности по полю на величину коэффициента дифракции, который, в свою очередь, должен быть измерен.

А сейчас вернемся к методам градуировки.

1. Метод взаимности

Наиболее распространенным и универсальным методом абсолютной градуировки как микрофонов, так и гидрофонов в настоящее время стал метод, основанный на использовании принципа взаимности, который может быть сформулирован следующим образом: чувствительности любого линейного обратимого преобразователя в режиме излучения и приема связаны между собой постоянным соотношением, называемым коэффициентом взаимности. Под обратимым преобразователем мы понимаем такой преобразователь, который может служить и излучателем и приемником (Ананьева, 1963). Значения коэффициентов взаимности при излучении и приеме сферических, цилиндрических или плоских волн соответственно равны:

$$H = \frac{2r\lambda}{\rho c} = \frac{2r}{\rho f}, \quad (66)$$

$$H = \frac{2\sqrt{r\lambda} \cdot h}{\rho c} = \frac{2h}{\rho} \sqrt{\frac{r}{fc}}, \quad (67)$$

$$H = \frac{2S}{\rho c}, \quad (68)$$

где r — расстояние между точкой излучения и точкой приема; λ — длина волны звука в среде; ρ — плотность среды; c — скорость звука в среде; f — частота; L — длина цилиндрического преобразователя; S — площадь плоского преобразователя.

Для проведения градуировки по методу взаимности, кроме градуируемого приемника звука, необходимо иметь вспомогательный источник звука и обратимый преобразователь. Градуируемый приемник звука может при этом быть необратимым, т. е. в качестве излучателя его использовать нельзя. Так бывает, когда определяется чувствительность приемника звука на выходе предварительного усилителя, к которому подключен приемник звука.

Процедура градуировки содержит три этапа измерений (рис. 34).

Первый этап: вспомогательный источник звука (I) создает в месте расположения испытуемого приемника звука (обозначен буквой x) звуковое давление P , вызывающее напряжение U_1 на выходных зажимах приемника звука. На этом этапе измеряют только значение U_1 .

Второй этап: режим работы вспомогательного источника (I) не изменяют, а приемник звука заменяют обратимым преобразо-

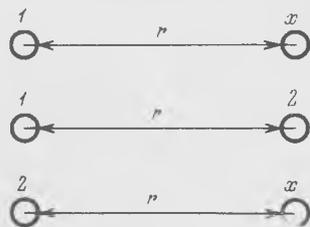


Рис. 34. Схема градуировки методом взаимности

вателем (2), работающим в режиме приема. При этом на его выходных зажимах измеряют напряжение U_2 .

Третий этап: обратимый преобразователь (2) используют в режиме излучения. Возбуждаемый ток I , он создает в месте расположения градуируемого приемника звука давление P , вызывающее напряжение U_3 на его выходных зажимах. Кроме напряжения измеряют еще ток I , протекающий через обратимый преобразователь.

Если расстояние между преобразователями на всех этапах измерений было одинаковым и равным r , то чувствительность градуируемого приемника звука M_x определяют по формуле

$$M_x = \sqrt{\frac{U_1 U_3}{U_2 I}} \cdot H, \quad (69)$$

где H — соответствующий параметр взаимности. Определение значения тока I , возбуждающего обратимый преобразователь, обычно производят путем измерения величины напряжения U на малом сопротивлении R , включаемом последовательно с преобразователем (его величина значительно меньше полного электрического сопротивления преобразователя во всем диапазоне частот градуировки). Значение тока I определяется выражением

$$I = \frac{U}{R}, \quad (70)$$

тогда формула (69) принимает вид

$$M_x = \sqrt{\frac{U_1 U_3}{U_2 U}} RH. \quad (71)$$

Мы рассмотрели схему измерений по методу взаимности в случае свободного поля, т. е. при отсутствии посторонних предметов или границ, искажающих звуковое поле. Практическое осуществление градуировки приемников звука методом взаимности в ре-

альных условиях свободного неограниченного поля встречает ряд трудностей. Поэтому разработаны модификации описанного метода, позволяющие выполнять градуировку в ограниченном объеме. При этом должны быть выполнены некоторые условия, позволяющие пользоваться приведенными выше соотношениями.

Одна из модификаций метода состоит в том, что измерения проводят в замкнутом объеме, но стенки объема делают поглощающими звук. Создается иллюзия свободного пространства (нет отражений).

Другая модификация метода основана на использовании импульсного режима работы, когда оказывается возможным разделить по времени прямой звуковой сигнал и отраженные. При этом нет необходимости заглушать стены помещения (или бассейна), в котором проводятся измерения.

Большое распространение получила модификация метода, при которой измерения проводят в камере малого объема, когда выполняется условие $l \ll \lambda$ (максимальный размер камеры много меньше длины звуковой волны).

Градуировка приемников звука методом взаимности может проводиться как в воздушной, так и в водной среде и дает чувствительность приемника звука по полю во всех рассмотренных выше модификациях, кроме случая камеры малого объема, где измеряется чувствительность по давлению.

2. Шариковый калибратор

Шариковый калибратор разработан фирмой Брюль и Кьер и используется для экспресс-градуировки (или калибровки) микрофонов в полевых условиях. В корпусе (1) (рис. 35, а), имеющем два сообщающихся между собой отделения, помещено много

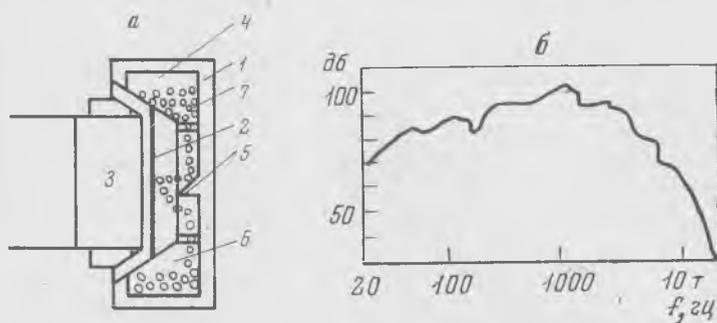


Рис. 35. Шариковый калибратор

а — устройство; б — спектр шума

мелких стальных шариков (7). Прибор включают в работу поворотом корпуса в положение, при котором шарики оказываются в верхней полости (4) и пересыпаются в нижнюю (6) под действием силы тяжести. По пути шарики ударяются об отражающую приз-

му (5) и специальную мембрану (2), что и является причиной звука. Против мембраны на определенном расстоянии помещают калибруемый микрофон (3). Время, за которое все шарики пересыпаются из верхнего положения в нижнее, равно 14 сек. Этого достаточно для проведения отсчета на измерительном приборе. Суммарное звуковое давление у мембраны составляет около 108 дБ относительно $2 \cdot 10^{-5} \text{ н/м}^2$. Создаваемый этим источником шум имеет характер случайного шума. Спектр шумов шарикового источника представлен на рис. 35, б.

3. Метод пьезоэлектрической компенсации

Метод пьезоэлектрической компенсации разработан Голенковым и Павловым (1967) для абсолютной градуировки ненаправленных гидрофонов с максимальным размером не более 50 мм. Диапазон частот градуировки 1 гц — 5 кгц. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 36. Установка состоит из массивной камеры (1), заполненной водой, и расположенных в ней трех акустических преобразователей. Один из преобразователей служит излучателем (2) и предназначен для создания в камере звукового давления нужной частоты. Два других преобразователя (3 и 4), представляющие собой пьезокерамические цилиндры разных диаметров, расположены коаксиально (один внутри другого). Пространство между ними заполнено эпоксидным компаундом.

Установка работает следующим образом. В камере устанавливают градулируемый гидрофон (5) и создают звуковое давление излучателем (2), питаемым от генератора (6). Звуковое давление воздействует на пьезоцилиндр (3) и вызывает в нем деформации. Эти деформации пьезоцилиндра (3) передаются через эпоксидный компаунд пьезоцилиндру (4) и вызывают на его обкладках потенциал, обусловленный прямым пьезоэффектом. На обкладках пьезоцилиндра (3) подают напряжение от того же генератора (6), что и на излучатель, но через фазовращатель (7). Фазу и амплитуду напряжения подбирают такой, чтобы вызванный им обратный пьезоэффект полностью затормозил колебания пьезоцилиндра. Торможение пьезоцилиндра (3) приведет к тому, что звуковое давление, создаваемое излучателем (2), перестанет передаваться через пьезоцилиндр (3) к пьезоцилиндру (4), и осциллоскоп (12), подключенный к его обкладкам через усилитель (11), отметит отсутствие пьезопотенциала, обусловленного воздействием звукового давления. В этот момент измеряют напряжение на выходе гидрофона (U) и компенсационное напряжение на обкладках пьезоцилиндра (3). Чувствительность гидрофона вычисляют по формуле

$$E = \frac{U}{P} = \frac{1}{M} \cdot \frac{U}{U_k}, \quad (72)$$

Здесь M — постоянная для данной установки. Она определяется раз навсегда в отдельном эксперименте. Схема эксперимента показана на рис. 37. Полость измерительной камеры (1) посредством гибкой трубки (2) сообщается с дополнительным открытым сосудом (3), установленным на вибростоле (4), совершающем синусоидальные колебания по вертикали. Всю систему заполняют водой, и начальное гидростатическое давление определяют по

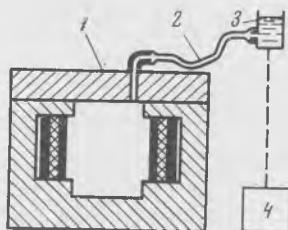
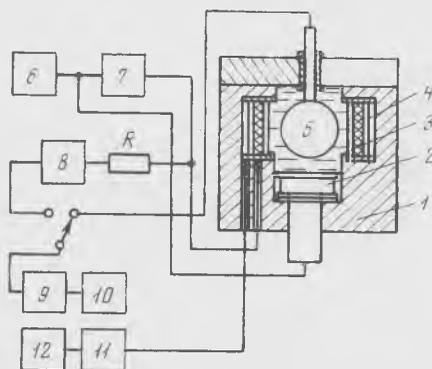


Рис. 36. Блок-схема измерительной установки

Рис. 37. Схема измерения постоянной M

положению свободного мениска в открытом сосуде. В такт колебаниям свободной поверхности изменяется гидростатическое давление в камере

$$P^0 = \rho gh \sin \omega t, \quad (73)$$

где ρ — плотность воды; g — ускорение силы тяжести; h — амплитуда колебательного смещения. Частоту колебаний вибростола выбирают достаточно низкой (0,3—0,4 гц), чтобы влиянием инерционных сил в колеблющейся жидкости можно было пренебречь из-за малости колебательных ускорений. При этом производят компенсацию колебаний пьезоцилиндра подачей соответствующего напряжения U_k^0 на его обкладки. Постоянную M вычисляют по формуле:

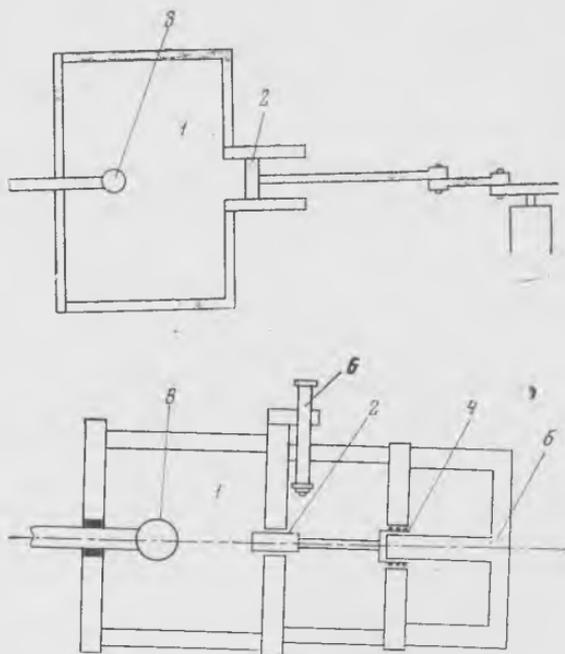
$$M = \frac{P^0}{U_k^0}. \quad (74)$$

Для того чтобы градуировку можно было проводить в диапазоне частот 1 гц — 5 кгц, размеры камеры (в мм) должны быть не выше следующих: диаметр — 78, высота — 105. Среднеквадратичная погрешность градуировки описанным методом не превышает 3%.

4. Метод пистонфона

Применяется для градуировки микрофонов и гидрофонов в диапазоне низких частот (от долей герца до 200 ÷ 250 гц) (Мясников, 1937).

Рис. 38. Схема пистонфонной установки с механическим (а) и электродинамическим (б) возбуждением



На рис. 38, а и б схематически изображены две пистонфонные установки. Одна из них с механическим возбуждением, другая - с электродинамическим. В первом случае переменное звуковое давление в камере (1) задают колебательным движением поршня (2), который, в свою очередь, приводится в движение с помощью электродвигателя и эксцентрика. Градуированный микрофон (или гидрофон) 3 устанавливают внутри камеры или в ее стенке так чтобы приемная диафрагма была обращена внутрь камеры. Камера должна быть герметичной.

Во втором случае поршень (2) соединен с подвижной катушкой (4), находящейся в зазоре постоянного магнита (или электромагнита) (5). Ток возбуждения от специального генератора (на рисунке не показан) поступает в катушку и заставляет ее совершать колебания, которые передаются поршню. Микрофон (или гидрофон) (3) устанавливают так же, как в предыдущем случае. Чувствительность приемника звука определяют как отношение электрического напряжения на его выходе к величине амплитуды давления в камере (1), которую вычисляют по формуле:

$$P = \gamma P_0 \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (75)$$

где P_0 — атмосферное давление; V_0 — объем камеры; ΔV — изменение объема при колебаниях поршня; $\gamma = 1,4$ для воздуха. Изменение объема ΔV равно произведению площади поршня на амплитуду его смещения. Амплитуду смещения измеряют либо с помощью обычной измерительной линейки (когда амплитуда

достаточно велика), либо с помощью микроскопа (6) (см. рис. 38). Однако формула (75) справедлива лишь в сравнительно узком диапазоне частот. Нижняя граница диапазона определяется условием

$$3,9 \cdot f^{1/2} \cdot \frac{V_0}{S} > 10, \quad (76)$$

которое обусловлено тем фактом, что в области низких частот адиабатический закон деформации воздуха в камере сменяется изотермическим. Здесь S — внутренняя поверхность камеры. Верхняя граница диапазона определяется условием

$$kl \ll 1, \quad (77)$$

которое представляет собой требование малости размеров камеры по сравнению с длиной волны. Здесь $k = 2\pi/\lambda$, l — длина камеры, λ — длина звуковой волны в воздухе. Частотные пределы применимости формулы (75) могут быть расширены почти на два порядка, если ввести в нее соответствующие поправки, учитывающие термодинамические и волновые явления (Романенко, Бугулавская, 1968). Тогда формула (75) примет вид:

$$P = K \cdot C \cdot \gamma \cdot P_0 \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (78)$$

где

$$K = \left[\sqrt{1 + (\gamma - 1) \frac{1 - e^{-x} \sqrt{2} \cos \left(x + \frac{\pi}{4} \right)}{x}} + \frac{(\gamma - 1)^2}{2x^2} (1 - 2e^{-x} \cos x + e^{-2x}) \right]^{-1}, \quad (79)$$

$$C = kl \frac{\cos kl (1 - \alpha)}{\sin kl}. \quad (80)$$

Здесь $x = 4l \sqrt{f}$; $\alpha = x/l$, x — координата микрофона, отсчитанная вдоль оси цилиндрической камеры от среднего положения поршня.

Фирма Брюль и Кьер выпускает миниатюрные пистонфоны для градуировки микрофонов на одной частоте, равной 250 гц. Пистонфон имеет автономное питание и позволяет градуировать микрофоны (той же фирмы) с погрешностью менее 0,2 дб.

5. Электростатический метод

Применяется для градуировки только приемников звука (микрофонов и гидрофонов), имеющих плоскую приемную поверхность. В частности, этим методом удобно градуировать гидрофоны (см. стр. 42) с механической трансформацией звукового давления. На рис. 39 показана схема градуировки электростатическим методом. На приемнике звука (1) закрепляют на изолирующих прокладках (2) дополнительный металлический

электрод (3) таким образом, чтобы между приемной поверхностью звукоприемника и дополнительным электродом оставался зазор толщиной d . Между звукоприемником и дополнительным электродом прикладывают постоянное и переменное напряжение одновременно, величины которых соответственно равны E и U , причем должно выполняться условие $E \gg U$. При этом между дополнительным электродом и приемной поверхностью звукоприемника

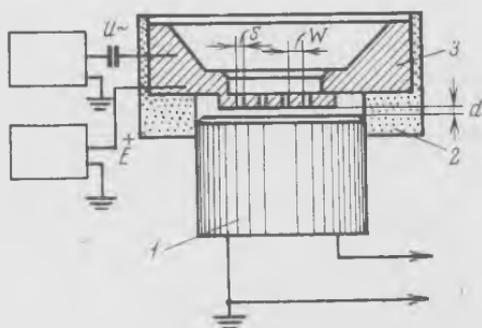


Рис. 39. Схема градуировки электростатическим методом

возникает сила взаимодействия. В результате давление, действующее на приемную поверхность звукоприемника, определяют по формуле

$$P = \frac{8,85 \cdot E \cdot U}{d^2} \cdot 10^{-8} \text{ н/м}^2, \quad (81)$$

где E и U выражены в вольтах, d — в сантиметрах. При малых зазорах и больших значениях применяемых напряжений на результате градуировки может сказаться упругость воздуха между приемной мембраной и добавочным электродом. Для устранения влияния упругости воздуха иногда применяют перфорирование электрода, что, разумеется, несколько изменяет давление. В этом случае для расчета давления в формуле (81) вместо d следует брать величину

$$d_1 = \frac{d \left(1 + \frac{W}{S} \right)}{2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{S}{2d}}, \quad (82)$$

где W и S — величины, определяющие характер перфорации электрода (см. рис. 39). При расчете давления по формуле (81) следует помнить, что частота изменения давления совпадает с частотой приложенного переменного напряжения U . В этом случае есть опасность помехи в виде электромагнитной наводки со стороны генератора напряжения U . Если опасность помехи не исключена и звукоприемник имеет достаточно высокую чувствительность, то можно проводить градуировку при нулевом значении постоянного напряжения, т. е. между дополнительным электродом и зву-

коприемником прикладывают только переменное напряжение U . В этом случае частота переменного давления вдвое выше частоты прикладываемого напряжения, и полезный сигнал на выходе звукоприемника легко отделить от электромагнитной наводки. Однако величина давления при этом существенно меньше, чем в предыдущем случае, и вычисляется по формуле:

$$P = \frac{2,21 \cdot U^2}{d^2} \cdot 10^{-8} \text{ н/м}^2. \quad (83)$$

Точность градуировки электростатическим методом определяется главным образом точностью измерения толщины зазора d , который не всегда оказывается возможным измерить достаточно точно. Если нет необходимости проводить абсолютную градуировку, то электростатический метод позволяет легко определять частотную характеристику звукоприемника. В этом случае не нужно измерять толщину зазора. Нужно только менять частоту прикладываемого к зазору переменного напряжения, поддерживая его величину постоянной. Тогда выходное напряжение звукоприемника будет соответствовать его частотной характеристике.

6. Гидростатический метод

Гидростатический метод градуировки пьезоэлектрических приемников звука оригинален тем, что не требует излучателей звуковой энергии, и поэтому градуировка производится в отсутствие звукового поля. Сущность метода состоит в том, что приемник подвергают воздействию гидростатического давления, изменяющегося по линейному закону. В этом случае чувствительность приемника определяется соотношением (Raymond, 1963):

$$M = \frac{K}{(C + C_x)} \cdot \frac{\omega}{\{[1/R(C + C_x)]^2 + \omega^2\}^{1/2}}. \quad (84)$$

Здесь K — постоянная приемника, которая должна быть предварительно определена; $C + C_x$ — сумма емкостей пьезоэлемента и входа схемы, к которой подключен пьезоэлемент; R — сопротивление нагрузки пьезоэлемента; $\omega = 2\pi f$; f — частота. Второй множитель в формуле (84) определяет частотную зависимость чувствительности приемника в области дорезонансных частот.

Постоянная приемника может быть определена следующим образом. На рис. 40 показана схема эксперимента по определению постоянной K . Гидрофон (1) поднимают из воды с постоянной скоростью с помощью электродвигателя (2), барабана (3) и прочной нити (4). При этом на выходе гидрофона появляется электрический потенциал постоянной величины U , который усиливается усилителем постоянного тока (5) и измеряется с помощью измерительного прибора (6), которым, в частности, может быть осцил-

логграф (или вольтметр). Тогда постоянная K вычисляется по формуле

$$K = \frac{U}{R \cdot r}, \quad (85)$$

где R — сопротивление, которым нагружен гидрофон (входное сопротивление усилителя); r — скорость вытаскивания гидрофона из воды. Из формулы (85) следует, что чувствительность метода

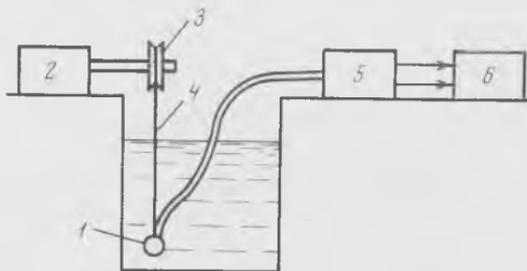


Рис. 40. Схема эксперимента по определению постоянной R

зависит от величин R и r . Чем больше R и r , тем больше напряжение, развиваемое на выходе гидрофона. В качестве электродвигателя с известным числом оборотов вала в секунду может быть использован двигатель самописца Н-110. Метод легко осуществим в лабораторных условиях. Следует подчеркнуть практическую ценность описанного метода для градуировки гидрофонов в области низких частот, при которых градуировка в звуковом поле встречает известные затруднения.

7. Метод, основанный на сбросе статического давления

Этот метод чрезвычайно прост. Он предназначен для градуировки миниатюрных цилиндрических гидрофонов и основан на быстром сбросе статического давления, действием которого был подвергнут чувствительный элемент гидрофона, предварительно помещаемый в толстостенную камеру малого объема, закрытую диафрагмой (Рой, Фролов, 1961). В камеру подают воздух под известным давлением. При некотором давлении диафрагма прорывается и давление падает до атмосферного. Возникающее на выходе гидрофона электрическое напряжение осциллографируется. Чувствительность гидрофона находят как отношение максимального напряжения к давлению в камере перед прорывом диафрагмы.

Конструкция камеры давления показана на рис. 41. Камера имеет объем в несколько кубических сантиметров. Верхней крышкой камеры служит диафрагма (1), зажатая по краю ввинчивающимся кольцом, снабженным резиновым уплотнением (2). В качестве материала для диафрагмы может быть применена фотопленка шириной 35 мм. При диаметре свободной части диафрагмы

23 мм она прорывается при давлении 10—13 атм. Сжатый воздух подает в камеру из баллона через редуктор достаточно медленно, чтобы можно было замерить давление в камере перед прорывом диафрагмы. За время подъема давления в камере электрический заряд с пьезоэлемента градуируемого гидрофона (3) должен успевать стекать через входное сопротивление осциллографа, к которому присоединен гидрофон. Однако входное сопротивление должно быть достаточно высоким, чтобы за время сброса давления

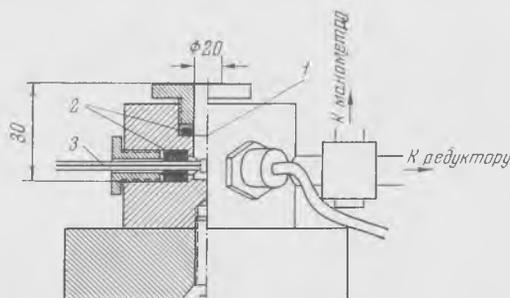


Рис. 41. Камера давления

после прорыва диафрагмы электрическое напряжение на выходе гидрофона не успело существенно снизиться из-за стекания пьезозарядов. Поэтому давление должно сбрасываться, по возможности, быстро, что и вынуждает уменьшать внутренний объем камеры. При указанном выше объеме камеры сброс давления происходил приблизительно за 200 мсек. Следовательно, постоянная времени RC , где C — емкость пьезоэлемента, включая подводящий кабель и вход осциллографа, а R — результирующее сопротивление, состоящее из параллельно включенных сопротивлений входа осциллографа и утечки гидрофона, должна быть по

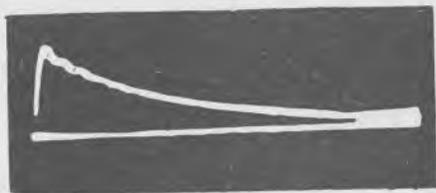


Рис. 42. Рабочая осциллограмма

крайней мере на порядок больше 200 мсек. После прорыва диафрагмы давление вследствие инерции расходящегося потока газа, вытекающего из камеры, падает несколько ниже атмосферного и после нескольких колебаний стремится к атмосферному. Колебания напряжения, происходящие с периодом, приблизительно равным 500 мсек, отмечаются гидрофоном. Рабочая осциллограмма приведена на рис. 42. При определении чувствительности необходимо усреднить колебания напряжения и отнести его к по-

казанию манометра перед прорывом диафрагмы. При значениях избыточного давления около 10 атм (по сравнению с атмосферным) и более возможная ошибка, связанная с учетом колебаний давления в процессе установления, — несущественна. Например, при анализе осциллограммы, приведенной на рис. 42, ошибка не превышает 10%. Если же избыточные давления имеют величину, равную нескольким атмосферам, усреднение колебаний необходимо производить возможно тщательнее.

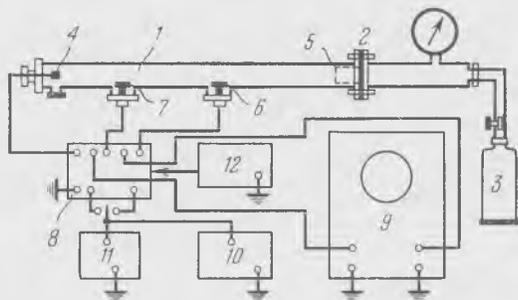
8. Метод градуировки с помощью ударной волны

Сущность метода заключается в том, что чувствительность гидрофона находят по величине электрического напряжения, возникающего на выходе гидрофона под действием ударной волны. Амплитуду волны вычисляют по измеряемой скорости ее распространения. Скорость ударной волны и напряжение на выходе гидрофона определяют по осциллограмме, фотографируемой с экрана осциллографа (Рой, Фролов, 1961). Этот метод пригоден для градуировки миниатюрных цилиндрических пьезоэлектрических гидрофонов, имеющих постоянную чувствительность в диапазоне частот 10—100 кгц.

Блок-схема установки для градуировки гидрофонов приведена на рис. 43. Ударная труба диаметром 50 мм с толщиной стенки 5 мм состоит из отсеков длиной 500 и 1400 мм. Отсеки разделены диафрагмой из фотоленки, зажимаемой между фланцами, снабженными уплотнительными резиновыми кольцами. В короткий отсек из баллона подается через редуктор сжатый воздух под давлением около 7 атм. до прорыва диафрагмы. После ее прорыва во второй отсек устремляется волна давления. Чтобы предохранить находящийся во втором отсеке градуируемый гидрофон от ударов

Рис. 43. Блок-схема установки

1 — ударная труба; 2 — диафрагма; 3 — баллон со сжатым воздухом; 4 — гидрофон; 5 — защитная сетка; 6 и 7 — датчики; 8 — радиотехническая часть; 9 — осциллограф; 10 — генератор; 11 и 12 — вспомогательные блоки



обрывков диафрагмы, между фланцами зажимается вкладыш в виде трубки диаметром 50 мм и длиной 50 мм, затянутой пропапанной латунной сеткой из проволоки 0,5 мм с ячейкой 5 × 5 мм². Пропайка предохраняет сетку от перебивания проволочек после нескольких прорывов диафрагмы. Волна давления, распростра-

няясь во втором отсеке трубы, превращается в ударную волну с крутым передним фронтом и пологим спадом давления за фронтом. Давление спадает тем медленнее, чем больше объем первого отсека трубы. Давление непосредственно за фронтом связано со скоростью распространения ударной волны следующим соотношением:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma M_1^2(\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \quad (86)$$

где P_1 и P_2 — соответственно давление за фронтом и перед фронтом ударной волны (P_1 равно начальному давлению во втором

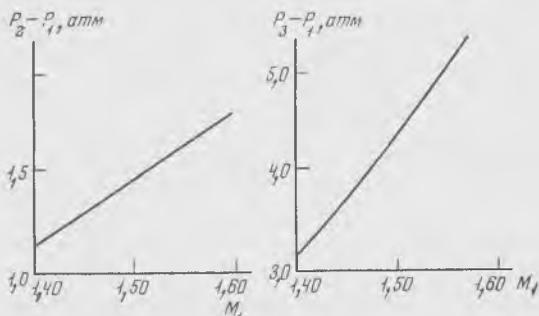


Рис. 44. Зависимость избыточного давления за фронтом падающей волны от скорости ее распространения

Рис. 45. Зависимость избыточного давления за фронтом отраженной волны от скорости ее распространения

отсеке); M — отношение скорости ударной волны к скорости звука при данной температуре; γ — отношение теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме. Ударная волна отражается от заглушки на конце второго отсека. Давление за фронтом отраженной волны P_3 находится из соотношения

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{2\gamma M_2^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \quad (87)$$

где

$$M_2^2 = \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{2 + (\gamma - 1) M_1^2}. \quad (88)$$

Величина P_2 может быть принята равной давлению за фронтом падающей волны, если расстояние от заглушки до точки наблюдения не слишком велико и давление за фронтом падающей волны не успеет заметно снизиться. Величина γ в формулах предполагается постоянной и равной 1,4, что справедливо для давлений в ударной волне порядка нескольких атмосфер. При более высоких давлениях величина может изменяться из-за диссоциации газа благодаря разогреву его на фронте волны.

Приведенные формулы дают возможность представить графически (рис. 44 и 45) соотношения

$$P_2 - P_1 = f(M_1), \quad (89)$$

$$P_3 - P_1 = f(M_1), \quad (90)$$

которые связывают избыточное давление за фронтом падающей и отраженной волн в отсеке трубы, где распространяется ударная волна, со скоростью распространения. Обычно P_1 устанавливают равным атмосферному давлению.

Для определения скорости распространения ударной волны служит устройство, позволяющее измерить время пробега ею известного пути. Чувствительные элементы устройства состоят из датчиков (см. рис. 43), вмонтированных в стенку второго отсека трубы. Датчик (6) находится от диафрагмы на расстоянии 700 мм, что достаточно для формирования ударной волны. Датчик (7) расположен на расстоянии 500 мм от датчика (6). Когда ударная волна достигает датчика (6), включается развертка осциллографа, и на ней появляются метки времени. При достижении ударной волной датчика (7) метки времени выключаются. Скорость ударной волны находят как отношение расстояния между датчиками ко времени, необходимому для его пробега.

Градуированный гидрофон устанавливают либо по оси трубы на торцевой заглушке, либо вблизи нее в стенке трубы. Возможность изменения положения гидрофона позволяет обследовать его чувствительность при разных ориентациях относительно направления распространения ударной волны.

Радиотехническая часть (8) установки должна:

— обеспечивать однократный запуск развертки осциллографа (9) сигналом от первого датчика и не допускать перезапуска развертки отраженными волнами,

— обеспечивать точность запуска, т. е. вырабатывать запускающие импульсы с достаточно крутым фронтом,

— отмечать с достаточной точностью момент прихода ударной волны ко второму датчику,

— иметь достаточно широкую полосу пропускаемых частот, чтобы не возникли искажения сигнала от градуированного гидрофона,

— обеспечивать возможность градуировки канала усиления электрическим напряжением известной величины.

Блок-схема радиотехнической части приведена на рис. 46. Она состоит из четырех основных узлов. Узел I формирует стартовый импульс для запуска развертки осциллографа из импульса напряжения отрицательной полярности, поступающего от датчика (1) (см. рис. 43) на вход 1 узла I. Стартовый импульс с выхода (1) поступает на вход блока развертки осциллографа. Узел II формирует метки времени. Для этого на вход (5) при замкнутом выключателе B_1 подается непрерывное синусоидальное напряжение от специального генератора (см. рис. 43, 10) с частотой 50 кгц, которое преобразуется в последовательность отрицательных импульсов, служащих метками времени. Последние с выхода 2 поступают на вход усилителя канала вертикального отклонения луча осциллографа.

Узел III формирует электрический сигнал, выключающий метки

времени в момент, когда ударная волна приходит к датчику (7), подключенному ко входу 2.

Узел IV служит для усиления сигнала, поступающего с градуируемого гидрофона, подключенного ко входу 3. Усиленный сигнал через выход (2) поступает на вход осциллографа. Вход (4) служит для подачи градуировочного электрического напряжения известной величины и частоты 50 кгц. При этом выключатель B_1

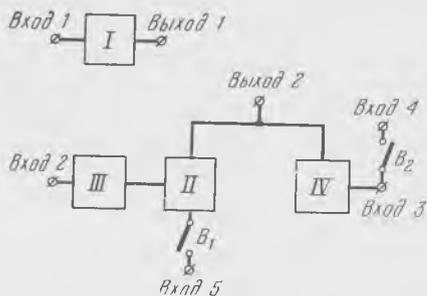


Рис. 46. Блок-схема радиотехнической части

разомкнут, а выключатель B_2 замкнут. Однократный запуск осциллографа для фотографирования градуировочного сигнала производят нажатием специальной кнопки, предусмотренной в узле I.

Следует иметь в виду, что если за фронтом отраженной волны на небольших расстояниях от заглушки скорость частиц газа близка к нулю, то за фронтом падающей волны она может достигать весьма больших значений. Скорость частиц воздуха за фронтом падающей волны может быть вычислена по формуле

$$v = C_{\text{уд}} \frac{2(M_1^2 - 1)}{(\gamma + 1)M_1^2} \quad (91)$$

Если, например, скорость распространения ударной волны $C_{\text{уд}}$ равна 500 м/сек, что соответствует $M_1 = 1,46$, величина $v = 220$ м/сек. Поэтому при градуировке в падающей волне необходимо принимать во внимание, что при обтекании гидрофона потоком воздуха с большой скоростью давление на поверхности чувствительного элемента гидрофона может существенно отличаться от расчетного. Действительно, градуировка гидрофона, вводимого через боковой сальник, показала, что чувствительность при градуировке в падающей волне меньше, чем при градуировке в отраженной.

При градуировке гидрофона, введенного в трубу через боковой сальник, в падающей волне обнаруживается зависимость чувствительности гидрофона от угла поворота вокруг его оси, связанная, по-видимому, с неоднородностью толщины стенок гидрофона. Чувствительность того же гидрофона, установленного вдоль оси трубы, одинакова как в падающей, так и в отраженной

волнах и равна чувствительности при боковом падении отраженной волны.

Точность измерения определяется ошибками в нахождении давления в ударной волне и электрического напряжения на выходе гидрофона. Ошибка в нахождении давления определяется ошибкой измерения времени пробега ударной волной расстояния между датчиками. Эта ошибка составляет не более 2%. Ошибка в измерении времени пробега влечет за собой погрешность в определении числа M . Для интервала M_1 от 1,4 до 1,5 результирующая погрешность определения величины $P_3 - P_1$ равна 9%.

Если точность прибора, при помощи которого измеряют напряжение на выходе кабеля, входящего в комплект гидрофона, равна 5%, погрешность градуировки гидрофонов на описанной установке не превышает 14%. Разброс величины чувствительности гидрофона в пределах одной серии измерений и между сериями не превышает 5%.

9. Метод радиометра

Сущность метода состоит в том, что вначале измеряют интенсивность звуковой волны в некоторой точке поля с помощью прибора, называемого радиометром, а затем в ту же точку помещают градуируемый микрофон или гидрофон и при известной интенсивности поля определяют его чувствительность. Этим методом можно градуировать микрофоны и гидрофоны в широком диапазоне частот, примерно от 20 кгц до десятков мегагерц (Романенко, 1967).

Прежде чем описать конструкции радиометров, приведем некоторые сведения из теории радиационного давления в поле интенсивных звуковых волн. Радиационное давление звукового луча на плоскую границу раздела двух сред может быть записано в виде:

$$\bar{P} = \bar{E} (1 + R) \cos^2 \beta. \quad (92)$$

Здесь R — коэффициент отражения звука на границе раздела сред; β — угол падения звука на границу раздела сред; \bar{E} — среднее по времени значение плотности полной энергии плоской звуковой волны. При плоской звуковой волне, имеющей синусоидальную форму и падающей на отражающую плоскую границу раздела сред под прямым углом, соотношение (92) имеет вид

$$\bar{P} = 2 \cdot \frac{\bar{I}}{c}. \quad (93)$$

Здесь $\bar{I} = \frac{P^2}{2\rho c}$ — среднее по времени значение интенсивности волны; c — скорость звука в среде; P — амплитуда давления в волне. Однако не всегда интенсивная ультразвуковая волна имеет синусоидальную форму. Это условие выполняется лишь в непосредственной близости к излучателю. На некотором же рас-

стоянии от излучателя интенсивная ультразвуковая волна, как правило, искажается и может принимать даже пилообразную форму (Романенко, 1962). В этом случае соотношение между радиационным давлением и интенсивностью волны имеет вид, несколько отличный от (93). Действительно, учитывая, что

$$\bar{E} = \overline{\rho v^2} \quad (94)$$

и что в искаженной волне справедлива формула Фэя (Fay, 1931),

$$v = \frac{2b_1\omega}{(\gamma+1)\rho c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n(\omega t - ka)}{\operatorname{sh} n(\alpha_0 - \alpha_a)}, \quad (95)$$

можно написать:

$$\bar{P} = \sum_{n=1}^{\infty} B \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 n\omega t dt, \quad (96)$$

где $B = \frac{8b_1^2 \omega^2}{\rho c^2 (\gamma+1) \operatorname{sh}^2 n\alpha_0}$; T — период ультразвуковой волны;

$$b_1 = \frac{4}{3} \eta + \xi + \mu \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right); \quad \eta \text{ и } \xi — \text{соответственно}$$

первая и вторая вязкость; μ — коэффициент теплопроводности; C_v и C_p — соответственно теплоемкость при постоянном объеме и давлении; n — номер гармонической составляющей искаженной волны; γ — параметр, характеризующий нелинейность среды $\alpha_0 = \frac{\pi b_1 \omega}{(\gamma+1)P} \omega = 2\pi f$; f — частота. После выполнения интегрирования соотношение (96) принимает вид

$$\bar{P} = 2 \frac{P^2}{3\rho c^2}. \quad (97)$$

Примечательно, что соотношение (97) отличается от соотношения (93) лишь тем, что в знаменателе стоит 3 вместо 2, т. е. радиационное давление пилообразной волны на плоское отражающее препятствие, в 1,5 меньше, чем радиационное давление синусоидальной волны с такой же амплитудой давления на то же препятствие.

При сферическом препятствии сила радиации, действующая на препятствие и обусловленная синусоидальной и пилообразной волной, соответственно имеет вид:

$$F = \pi r^2 \frac{P^2}{2\rho c^2} \quad (98)$$

и

$$F = \pi r^2 \frac{P^2}{3\rho c^2}, \quad (99)$$

здесь r — радиус сферы.

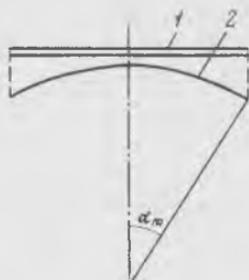
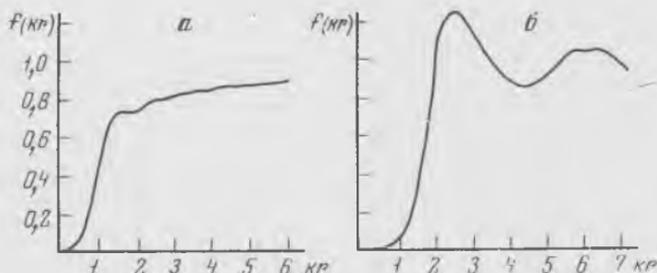


Рис. 47. Схема измерения с помощью плоского радиометра в поле сферически расходящейся волны

Рис. 48. Вид функции $f(kr)$ а — для сферического радиометра, б — для плоского радиометра



Соотношения (93), (97), (98) и (99) могут быть использованы для вычисления интенсивности синусоидальных и пилообразных ультразвуковых волн по измеренным значениям сил радиации, действующих на радиометр, помещенный в ультразвуковое поле, если выполняется условие

$$kr \gg 1, \tag{100}$$

т. е. если размеры радиометра много больше длины волны и он принимает плоскую волну. Здесь $k = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны; r — радиус диска или сферы радиометра.

Если фронт волны сферический, радиометр плоский, то следует вводить поправку в показания радиометра. Рассмотрим два типичных случая применения радиометра.

1. Измерения проводятся в непосредственной близости от излучателя (на расстояниях порядка длины волны). В этом случае реактивная составляющая сопротивления излучения еще имеет заметную величину и может существенно повлиять на результаты измерения. Расчет поправки очень сложен, поэтому в таких случаях радиометром лучше не пользоваться.

2. Измерения проводятся вдали от излучателя (расстояние от излучателя много больше длины волны), но фронт волны сферический. Этот случай иллюстрируется рис. 47, где 1 — радиометр, 2 — фронт волны. В таком случае при измерении радиационного давления в формулу (93) следует вводить поправочный множитель, равный $\cos^2 \frac{\alpha_m}{2}$.

При удалении от излучателя фронт волны становится все более плоским и множитель $\cos^2 \frac{\alpha_m}{2} \rightarrow 1$.

При $kr = 1$ в формулах (93), (97) и (99) появляется множитель $f(kr)$, учитывающий дифракцию волн на радиометре, размеры которого сравнимы с длиной волны. Аналитическое выражение для $f(kr)$ очень громоздко и здесь не приводится. На рис. 48 значение $f(kr)$ представлено графически для плоского и сферического радиометров соответственно, помещенных в поле плоских синусоидальных волн. Для случая пилообразных волн аналогичные множители могут быть рассчитаны без большого труда

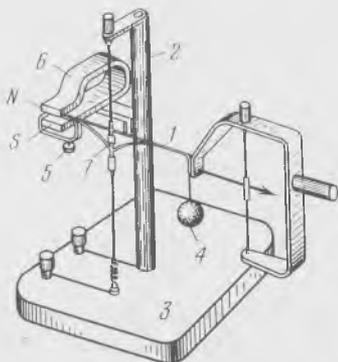


Рис. 49. Конструкция радиометра

Обычно конструктивно радиометр выполняют либо в виде различного рода весов, либо в виде плоского диска или сферы на упругой ножке, работающей на изгиб. Чрезвычайно оригинальная конструкция радиометра описана в работе (Мотулевич и др., 1950) и на ней стоит остановиться подробнее. Радиометр обладает высокой чувствительностью и дает возможность измерять силу радиации в диапазоне от 10^{-3} до 10^3 дин. Другим ценным качеством прибора является то, что чувствительный элемент (сфера) все время находится в одной и той же точке поля в отличие от радиометров других типов, у которых чувствительный элемент отклоняется от первоначального положения.

Устройство радиометра показано на рис. 49. Подвижная часть радиометра состоит из легкой прочной фермы (1), укрепленной на ленточных металлических растяжках на поворотной головке (корректоре) в стойке (2) и пружине в основании (3) прибора. На одном конце фермы подвешен на металлической ленте приемник радиационного давления — шар (4), а на другом укреплена прямоугольная рамка (5) из медной изолированной проволоки, взаимодействующая с полем постоянного магнита (6). Растяжки создают слабый противодействующий момент, устанавливаемый в соответствии с допустимым временем успокоения прибора, и используются для подвода тока к рамке, так как они изолированы между собой. В середине фермы укреплено зеркало (7). Звуковая волна, действующая с силой F на приемник 4 в направлении, перпендикулярном плоскости фермы, поворачивает подвижную часть радиометра. Взаимодействие между полем магнита и током I соот-

ветствующего напряжения и величины, пропускаемым через рамку 5, создает момент, возвращающий подвижную часть в исходное положение, т. е. компенсирующий момент силы F . Нормальное (нулевое) положение подвижной части точно восстанавливается при помощи светового указателя, отраженного на удаленную шкалу от зеркала 7. Так как при заданном магните величина указанногo взаимодействия определяется силой тока I , то градуировка прибора сводится к определению соотношения

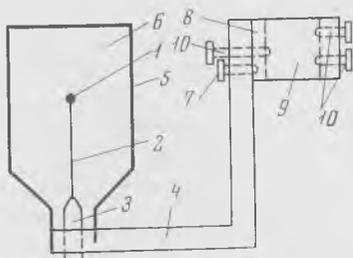


Рис. 50. Сферический радиометр

между F и I . Для этой цели служит динамометр, изображенный на том же рисунке справа.

Описанный радиометр отличается известной сложностью конструкции. Поэтому в тех случаях, когда не требуется высокой точности измерения и широкого диапазона измеряемых давлений, могут быть использованы более простые конструкции. Для измерений в воздухе в диапазоне частот 20—300 кгц нашел применение дисковый радиометр (Пустовалова, 1968) с чувствительным элементом в виде плоского диска диаметром 20 мм и толщиной 0,3 мм. Для измерений в воде нашли применение миниатюрный сферический радиометр (Романенко, 1962) и плоский радиометр (Архангельский и др., 1957). Миниатюрный сферический радиометр имел следующие параметры: диаметр сферы 0,9 мм, чувствительность радиометра 0,009 вт/см² на 1 деление микроскопа. В том случае, когда необходимо было измерять среднюю по сечению ультразвукового пучка интенсивность волн, использовался сферический радиометр с диаметром сферы 6,3 мм (чувствительность 0,015 вт/см² на 1 деление микроскопа) и плоский радиометр с диаметром диска 1,5 см (чувствительность 0,011 вт/см² на 1 деление микроскопа).

Конструкция сферического радиометра показана на рис. 50. Чувствительным элементом радиометра является сфера (1) из стекла, выполненная как одно целое с тонкой стеклянной ножкой (2) длиной 40—50 мм и диаметром 0,06—0,12 мм. В зависимости от размеров сферы она может быть полой (заполненной воздухом) или сплошной. Сфера с ножкой образована из капилляра (3) с внешним диаметром 2,5 мм. Капилляр вклеивают с помощью воска или клея БФ-2 в отверстие держателя из плексигласа (4). Шарик с ножкой обрамляют рамкой из плексигласа (5) толщиной

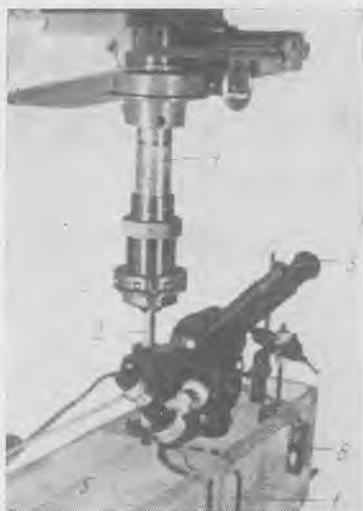
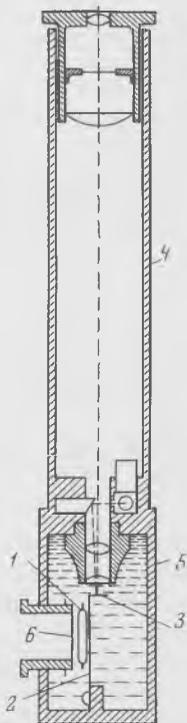


Рис. 51. Общий вид установки

Рис. 52. Плоский радиометр



1 мм и шириной 10 мм. Боковые отверстия обрамления заклеивают тонкой (около 10 мк) тефлоновой пленкой (6) и внутреннюю полость обрамления заполняют дистиллированной водой. Держатель из плексигласа с помощью винта (7) прикрепляют к направляющей муфте (8), имеющей овальное отверстие (9) и три установочных винта (10). С помощью муфты и установочных винтов радиометр укрепляют на стержне (2) (рис. 51), который, в свою очередь, зажимают в координатном устройстве (4). На этом же стержне закрепляют микроскоп (3) типа МБС-1 таким образом, что через плексигласовое обрамление радиометра в микроскоп видна сфера радиометра (1).

Радиометр работает следующим образом. С помощью координатного устройства (4) радиометр устанавливают в ванне с водой (5) в поле излучателя (6) (см. рис. 51). Если ультразвук попадает на радиометр, последний отклоняется от положения равновесия под действием сил радиации, что легко может быть отмечено по микрометрической шкале микроскопа (3). Для удобства наблюдения за сферой последняя покрашена с помощью очень тонкого слоя нитрокраски в черно-белый цвет. Граница раздела черной и белой половин служит идеальной риской, по которой ведется отсчет на шкале микроскопа.

При градуировке радиометра силу, необходимую для того, чтобы отклонить сферу на одно деление по шкале микроскопа, определяют непосредственным нагружением сферы разновесами (при горизонтальном положении радиометра до заполнения внутренней полости обрамления дистиллированной водой) и наблюдением соответствующего отклонения сферы в микроскоп. По формуле (7) или (8) вычисляют интенсивность ультразвуковых волн синусоидальной или пилообразной формы, необходимую для того, чтобы соответствующая ей сила радиации отклонила сферу радиометра на одно деление шкалы микроскопа.

Конструкция плоского радиометра показана на рис. 52. Радиометр представляет собой полый диск (1), закрепленный на плоской пружинящей стойке из фосфористой бронзы (2). Сверху находится микроскоп (4) со шкалой, позволяющей наблюдать по смещению пластинки (3) с рисками отклонение диска под действием радиационного давления. Полый диск радиометра и объектив микроскопа находятся в резервуаре (5), заполненном трансформаторным маслом, акустическое сопротивление которого мало отличается от акустического сопротивления воды. Масло отделено звукопроницаемой пленкой (6) от внешней среды. Градуировка радиометра производится так же, как и в предыдущем случае, путем нагружения диска разновесами.

10. Метод градуировки гидрофонов, основанный на измерении радиационного давления без использования радиометра

Этот метод, по-видимому, самый универсальный. Он позволяет проводить абсолютную и относительную градуировку гидрофонов различных конструкций в диапазоне частот от единиц герц до десятков мегагерц.

Согласно соотношению (92), радиационное давление звука на препятствие, помещенное в ультразвуковое поле, при нормальном падении звука может быть записано в виде

$$P_{\text{рад}} = (1 + R) \frac{I}{c}, \quad (101)$$

где в случае плоской волны $I = \frac{P^2}{\rho c}$, а P — эффективное значение давления. Если звуковая волна частоты ω модулирована по амплитуде частотой Ω , то радиационное давление будет иметь слагаемую частоты Ω , равную

$$P_{\Omega \text{рад}} = (1 + R) \frac{m P_{\omega}^2}{\rho c^2}, \quad (102)$$

где m — глубина модуляции. Уже в самом соотношении (102) заключена возможность определения частотных характеристик чувствительности гидрофонов в широком диапазоне частот (Ромащенко, 1957). Действительно, при сохранении постоянными значе-

ний m , ω и \dot{P}_ω величина $\dot{P}_{\Omega_{\text{рад}}}$ также будет оставаться постоянной при изменении частоты модуляции Ω в широких пределах. Если гидрофон принимает переменную составляющую радиационного давления при двух различных частотах модуляции Ω_1 и Ω_2 , то величина электрического напряжения на выходе гидрофона запишется в виде

$$\begin{aligned} U_{\Omega_1} &= M_{\Omega_1} P_\Omega, \\ U_{\Omega_2} &= M_{\Omega_2} P_\Omega. \end{aligned} \quad (103)$$

Здесь M_{Ω_1} и M_{Ω_2} — чувствительность гидрофона на частотах соответственно Ω_1 и Ω_2 . Из (103) получаем

$$\frac{M_{\Omega_2}}{M_{\Omega_1}} = \frac{U_{\Omega_2}}{U_{\Omega_1}}. \quad (104)$$

Фиксируя Ω_1 и изменяя Ω_2 , легко получить отношение чувствительности гидрофона в некотором диапазоне частот к чувствительности на частоте Ω_1 . Таким способом можно градуировать гидрофоны лишь в диапазоне частот модуляции, который должен быть существенно ниже несущей частоты. Однако, если гидрофон способен принимать ультразвуковые колебания не только в диапазоне частот модуляции, но и в диапазоне несущих частот, то некоторые видоизменения описанного метода позволяют расширить его возможности в область несущих частот. В этом случае к соотношениям (103) добавится еще одно:

$$U_\omega = M_\omega \cdot P_\omega, \quad (105)$$

где U_ω и M_ω — соответственно электрическое напряжение на выходе и чувствительность гидрофона на несущей частоте ω . Положим Ω и m — постоянными, тогда, используя соотношения (102), (103) и (105) для двух значений ω_1 и ω_2 , можно записать:

$$U_{\Omega\omega_1} = (1 + R) \frac{M_\Omega \cdot m}{\rho c^2} \left(\frac{U_{\omega_1}}{M_{\omega_1}} \right)^2, \quad (106)$$

$$U_{\Omega\omega_2} = (1 + R) \frac{M_\Omega \cdot m}{\rho c^2} \left(\frac{U_{\omega_2}}{M_{\omega_2}} \right)^2. \quad (107)$$

Отсюда получаем

$$\frac{M_{\omega_2}}{M_{\omega_1}} = \left(\frac{U_{\omega_2}}{U_{\omega_1}} \right) \cdot \sqrt{\frac{U_{\Omega\omega_1}}{U_{\Omega\omega_2}}}. \quad (108)$$

Как показал Зверев (1956), описанный метод может быть использован и для абсолютной градуировки гидрофонов и излучателей ультразвука. Действительно, из соотношений (102), (103) и (105) можно получить

$$P_\omega = \frac{\rho c^2}{(1 + R) m} \cdot \frac{M_\omega}{M_\Omega} \cdot \frac{U_\Omega}{U_\omega}, \quad (109)$$

что дает значение P_ω в функции легко измеримых величин.

Знания же абсолютного значения амплитуды ультразвукового давления достаточно для проведения абсолютной градуировки гидрофонов. Коэффициент отражения R для материала гидрофона в большинстве случаев известен. Величины m и U_{Ω}/U_{ω} определяют в процессе измерений. Отношение же M_{ω}/M_{Ω} можно определить следующим образом. Ультразвуковую волну некоторой частоты ω_0 , модулированную частотами ω и Ω (можно одновременно), посылают на гидрофон. Как следует из (102), при этом равным глубинам модуляции соответствуют равные давления. По отношению напряжений U_{Ω} и U_{ω} , получаемых в этом опыте, определяют M_{ω}/M_{Ω} .

Градуировку излучателей производят аналогично. Роль радиационного давления здесь играет «отдача», испытываемая поверхностью излучателя при испускании волн. Измерение величины «отдачи» с помощью гидрофона, помещенного вне луча ультразвуковых волн частоты ω , модулированных частотой Ω , и настроенного на частоту модуляции, позволяет определить резонансные характеристики излучателей. В этом случае при изменении несущей частоты ω и постоянной частоте модуляции Ω электрическое напряжение на выходе гидрофона меняется в соответствии с резонансной кривой излучателя. При этом абсолютная градуировка поля излучателя может быть проведена описанным выше способом с использованием соотношения (109).

Следует отметить, что описанный метод не применим в области резонансных частот гидрофонов, так как в этом случае коэффициент отражения R не остается постоянным.

11. Метод, основанный на использовании явления искажения формы волны конечной амплитуды

Метод предназначен для градуировки сверхминиатюрных и миниатюрных сферических и цилиндрических гидрофонов в широком диапазоне частот (от 400 кгц до десятков мегагерц). Прежде чем будет изложена сущность метода, приведем некоторые сведения из нелинейной акустики, которые нам будут нужны в дальнейшем.

При распространении волны конечной амплитуды в жидкости происходит искажение формы волны вследствие нелинейного характера уравнения состояния среды и уравнения движения. Характер искажений детально изучен для случая синусоидальных волн конечной амплитуды. Теоретически (Наугольных, 1959) и экспериментально (Романенко, 1962) установлено, что волна конечной амплитуды, имеющая у излучателя синусоидальную форму, становится пилообразной на некотором расстоянии от него. Это отчетливо иллюстрирует осциллограмма на рис. 53. Расстояние от излучателя, на котором плоская волна конечной амплитуды и синусоидальной формы становится пилообразной, определяется соотношением

$$L = \frac{\lambda \rho c^2}{\pi(\gamma + 1)P} \quad (110)$$

Здесь λ — длина волны; ρ — плотность жидкости; c — скорость звука; γ — параметр, характеризующий нелинейные свойства среды и равный для воды примерно 7; P — амплитуда давления в волне.



Рис. 53. Пилообразная ультразвуковая волна

Спектральный состав искаженной волны достаточно близок к спектральному составу идеальной пилообразной функции до номеров гармоник n , для которых выполняется неравенство,

$$\left(\frac{\gamma + 1}{2} \cdot \frac{P}{b\omega}\right)^2 \gg n^2. \quad (111)$$

Здесь $b = \frac{4}{3}\eta + \xi + \mu\left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p}\right)$; η — первая вязкость; ξ — вторая вязкость; μ — коэффициент теплопроводности; C_v и C_p — коэффициенты теплоемкости при постоянном объеме и давлении соответственно; $\omega = 2\pi f$; f — частота. Входящий в неравенство (111) параметр $P/b\omega$ характеризует степень проявления нелинейных эффектов, называется числом Рейнольдса и обозначается символом Re . Если $Re < 1$, нелинейные эффекты практически не

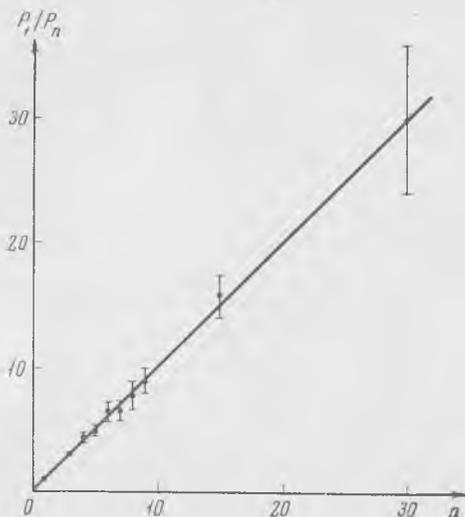


Рис. 54. Спектральный состав пилообразной волны

проявляются при распространении волны. Если $Re \geq 1$, нелинейные эффекты становятся заметными.

На рис. 54 показан спектральный состав искаженной волны при $Re = 47,5$, $f = 466$ кГц. По оси абсцисс отложены номера гармонических составляющих волны n , по оси ординат отложено отношение амплитуды P_1 первой гармоники к амплитуде P_n гармоники с номером n . Легко проверить, что для всех номеров гармоник, отложенных по оси абсцисс на рис. 54, выполняется неравенство (111). Что получается, если не выполняется неравенство (111), иллюстрирует график на рис. 55. По оси ординат отложена величина g_n/g_n^0 , где $g_n = P_1/P_n$ — отношение амплитуды первой гармоники к амплитуде гармоники номера n в пилообразной волне, $g_n^0 = \left(\frac{P_1}{P_n}\right)^0 = n$ — соответствующее отношение в пилообразной функции. Экспериментальные значения отмечены значками (кружки, крестики и т. п.), теоретические — сплошными линиями. Для тех значений n и Re , для которых выполняется неравенство (111), отношение $g_n/g_n^0 = 1$. На графике кривая $n = 6$ в пределах экспериментальной погрешности совпадает с линией $g_n/g_n^0 = 1$ при всех значениях Re . Действительно, даже при $Re = 5 \left(\frac{\gamma+1}{2} \cdot \frac{P}{b\alpha}\right)^2 \approx 400$, тогда как $n^2 = 36$ и, следовательно, неравенство (111) выполняется. Для $n = 30$ неравенство (111) уже не выполняется почти при всех значениях Re , отмеченных на графике. В соответствии с этим результаты эксперимента заметно отклоняются от линии $g_n/g_n^0 = 1$. Пилообразные волны поглощаются на 1—2 порядка сильнее, чем волны малой амплитуды. На рис. 56 приведены сводные данные ряда авторов по поглощению пилообразных волн.

По оси ординат отложено отношение α_n/α , где α_n — коэффициент поглощения пилообразных волн, α — коэффициент поглощения волн малой амплитуды. Сплошной линией показана теоретическая зависимость

$$\frac{\alpha_n}{\alpha} = \frac{\gamma+1}{\pi} \cdot \frac{P}{b\omega} \quad (112)$$

Многочисленные экспериментальные исследования подтверждают, что коэффициент поглощения пилообразных волн не зависит от характера расхождения волны, а зависит лишь от числа Рейнольдса, т. е. поглощение вызывается, в конечном счете, вязкостью и теплопроводностью среды.

В случае сферического расхождения волн изменение амплитуды пилообразной волны с расстоянием от излучателя определяется следующим соотношением

$$P_x = \frac{P_0}{1 + \frac{x_0(\gamma+1)P_0f}{\rho_0 c_0^3} \ln \frac{x}{x_0}} \cdot \frac{x_0}{x} \quad (113)$$

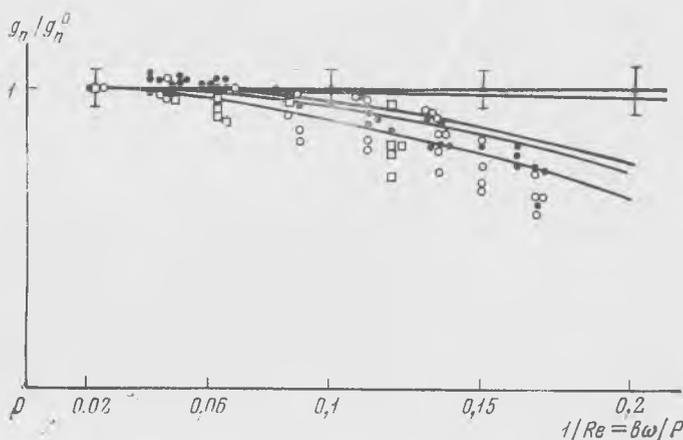


Рис. 55. Спектральный состав при условии невыполнения неравенства (111)

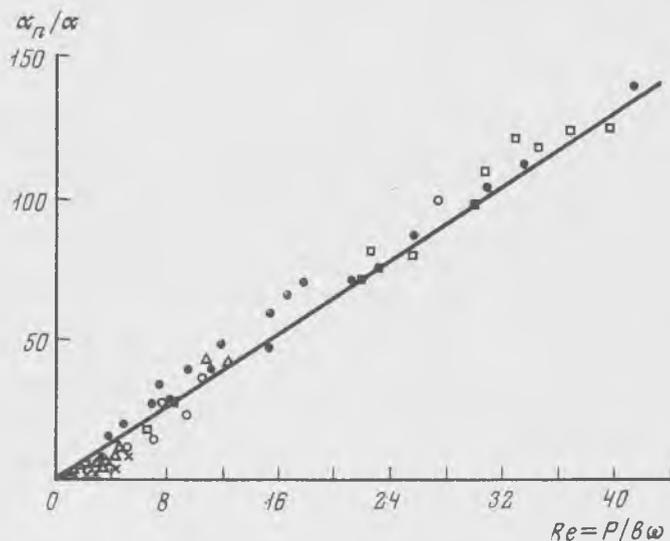


Рис. 56. Относительный коэффициент поглощения пилообразных волн в функции числа Рейнольдса

Здесь P_x и P_0 — амплитуды пилообразной волны на расстояниях x и x_0 от излучателя соответственно. Это соотношение в пределах экспериментальной погрешности (10—15%) выполняется в реальной волне и может быть использовано для градуировки гидрофонов. Представим соотношение (113) в виде:

$$P_0 = \left(\frac{P_0 x_0}{P_x x} - 1 \right) \frac{\rho_0 c_0^3}{(\gamma + 1)^2 x_0 \ln \frac{x}{x_0}}. \quad (114)$$

В правой части этого выражения величины P_0 и P_x входят в виде отношения, которое легко может быть измерено экспериментально. Таким образом, измерив P_0/P_x , x и x_0 , легко вычислить значение P_0 . Дальнейшая градуировка гидрофонов по известному P_0 не представляет труда. Практически измерения выполняются на установке, блок-схема которой показана на рис. 57. Излучателем служит резонансная пластинка из керамики титаната бария (3), питаемая от задающего генератора (1) через усилитель мощности (2).

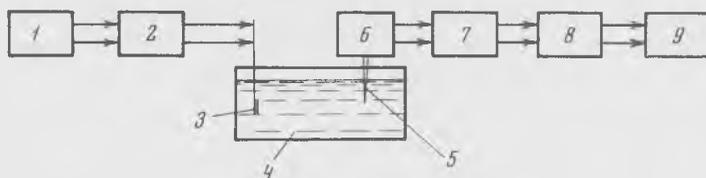


Рис. 57. Блок-схема установки

1 — генератор; 2 — усилитель мощности; 3 — излучатель; 4 — ванна с водой; 5 — гидрофон, 6 — предусилитель; 7 — гармонический анализатор; 8 — усилитель; 9 — осциллограф

(2). Ультразвуковые волны конечной амплитуды распространяются в ванне (4), заполненной водой, и принимаются миниатюрным гидрофоном (5). Электрический сигнал с гидрофона поступает через согласующий катодный повторитель (6), электронный гармонический анализатор (7) и широкополосный усилитель (8) на индикатор (9), которым, в частности, может служить электронный осциллограф.

Тот факт, что в установке используют плоский излучатель, не исключает возможности применения соотношения (114), справедливого для сферически расходящихся пилообразных волн. Плоский излучатель использован для того, чтобы дать возможность нелинейным явлениям привести к искажению формы волны в ближней зоне излучателя, где распространяется плоская волна. Искаженная волна при дальнейшем распространении перейдет в дальнюю зону излучателя и будет расходиться по сферическому закону. В дальней зоне поля, где справедливо соотношение (114), и проводятся все измерения. Использовать сферический излучатель вместо плоского, чтобы с самого начала иметь сферически расходящуюся волну, нецелесообразно, так как при таком расхождении получить пилообразную волну практически невозможно. Проводить измерения в ближней зоне излучателя нельзя вследствие сильных дифракционных искажений поля.

Измерения производят в следующем порядке. С помощью гидрофона и гармонического анализатора из пилообразной волны в зоне сферического расхождения на расстоянии x_0 от излучателя выделяют одну из первых гармоник P_{n0} и ее величину в относительных единицах отмечают на экране осциллографа. Затем эту

же гармонику выделяют на расстоянии x от излучателя (P_{nx}) и вновь отмечают ее величину. Отношение отмеченных величин будет равно P_0/P_x при условии линейности амплитудной характеристики приемной аппаратуры и пилообразности волны. Первое условие очевидно. Второе условие легко доказать. Действительно, для пилообразной функции справедливо соотношение

$$P = \frac{\pi}{2} n \cdot P_n. \quad (115)$$

Как отмечалось выше, при выполнении неравенства (111) это же соотношение справедливо и для ультразвуковой пилообразной волны. Но тогда можно записать

$$P_0 = \frac{\pi}{2} n P_{n0}, \quad (116)$$

$$P_x = \frac{\pi}{2} n \cdot P_{nx}. \quad (117)$$

Деля первое равенство на второе, получим

$$\frac{P_0}{P_x} = \frac{P_{n0}}{P_{nx}}. \quad (118)$$

Вычислив P_0 с помощью соотношения (114) и используя соотношение (116), легко получить абсолютные значения амплитуд гармонических составляющих, удовлетворяющих неравенству (111). Если после этого выделить с помощью градуируемого гидрофона и анализатора ряд гармоник и отметить их величины на экране осциллографа, а затем подать на вход усилительной аппаратуры калибровочные электрические сигналы частот, равных частотам соответствующих гармоник, то легко можно вычислить чувствительность гидрофона на частотах, соответствующих частотам гармоник волны. Относительная градуировка гидрофонов (определение только лишь частотной характеристики в относительных единицах) может быть проведена и без исследования характера спада амплитуды волны с расстоянием. Достаточно проанализировать спектральный состав ультразвуковой пилообразной волны, принятой градуируемым гидрофоном, и сравнить полученный состав со спектром пилообразной функции. При этом сравнение следует проводить только тех гармонических составляющих, номера которых удовлетворяют соотношению (111).

Оценим пределы применимости формулы (114). Эта формула справедлива для сферически расходящихся волн пилообразной формы. Следовательно, при использовании плоского излучателя диаметром D должно выполняться неравенство

$$x > x_0 > \frac{D^2}{4\lambda} > \frac{\lambda r c^2}{\pi(\gamma + 1)P}. \quad (119)$$

Здесь величина $D^2/4\lambda$ характеризует то расстояние от плоского излучателя, на котором начинается сферическое расхождение

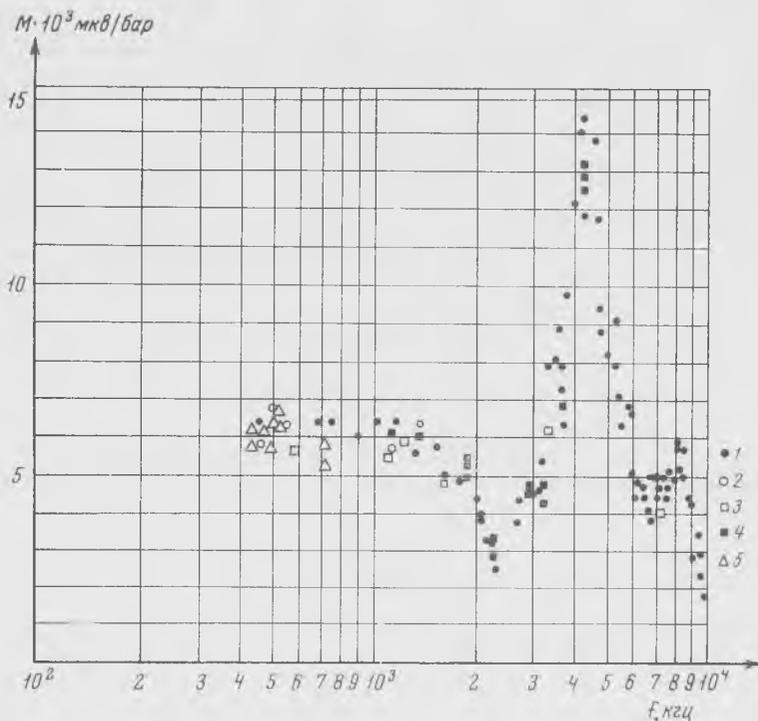


Рис. 58. Градуировка миниатюрного гидрофона разными методами:

1 — по пилообразной волне; 2 — взаимности по полю; 3 — плоского радиометра; 4 — сферического радиометра; 5 — сравнения с образцовым гидрофоном

волны. Из неравенства следует, что чем больше выбрано значение x , тем лучше выполняется закон сферического расхождения волны. Но с увеличением x заметно спадает амплитуда волны и уменьшается максимальный номер n , для которого еще справедливо неравенство (111). Таким образом, значение x должно быть выбрано при измерениях таким, чтобы в точке x еще выполнялось неравенство (111), где n — высший номер гармоники, входящий в рабочий диапазон частот.

Практически рабочий интервал значений x и n определяется очень легко. Для этого необходимо определить спадание амплитуд гармоник волны с увеличением расстояния от излучателя. Для тех значений n (а следовательно, и x), при которых выполняется неравенство (111), амплитуды всех гармоник должны спадать одинаково. При больших значениях n гармоники будут спадать заметно быстрее.

Описанным методом сравнительно легко можно градуировать гидрофоны в диапазоне частот 0,4—30 мГц. Основным преимуществом метода является то, что излучатель работает на одной (ос-

новой) частоте, а абсолютная градуировка производится сразу на 20—30 частотах, соответствующих гармоническим составляющим основной частоты.

Оценим точность описываемого метода градуировки. Учитывая простоту определения P_0/P_x , квадратичная погрешность измерений может быть сведена к весьма малой величине (около 3—5%). Но в выражение (114) входит величина γ , точное значение которой для воды пока не известно. В ряде работ для величины γ приводятся значения, заключенные в интервале между 6 и 7. Анализ большого объема экспериментальных данных позволяет принять для γ значение $6,5 \pm 10\%$. Таким образом, точность абсолютной градуировки гидрофонов может быть принята равной $\pm 13 \div 15\%$. Точность определения частотных характеристик гидрофонов может быть принята равной $8 \div 10\%$.

На рис. 58 представлены результаты градуировки описанным способом миниатюрного гидрофона с размером чувствительного элемента около 0,35 мм.

12. Метод вибрирующего столба жидкости

Сущность метода (Schloss a. oth., 1962) заключается в том, что градуируемый гидрофон погружается в жидкость, которая совершает колебательное движение. При этом давление колеблющейся жидкости на погруженный в нее неподвижный гидрофон оказывается легко рассчитываемым. Идея метода поясняется схемой на рис. 59. Этот метод имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с известным гидростатическим методом, при котором гидрофон совершает движения вверх — вниз в неподвижной жидкости. Во-первых, могут быть достигнуты более значительные амплитуды давления при тех же смещениях. Во-вторых, исключается погрешность, обусловленная чувствительностью гидрофона к собственным ускорениям. При колебании жидкости относительно гидрофона общее мгновенное изменение давления в месте расположения гидрофона складывается из изменения гидростатического давления и изменения давления, обусловленного ускорением жидкости:

$$P = \rho g x_h + \rho h \ddot{x}_h, \quad (120)$$

где h — средняя глубина гидрофона; x_h — смещение частиц жидкости от среднего положения в точке расположения гидрофона. В большинстве практических случаев первым членом в правой части выражения (120) можно пренебречь по сравнению со вторым. Например, при синусоидальном законе колебательного движения, частоте колебаний 10 гц и глубине 10 см член, обусловленный ускорением, в 40 раз больше гидростатического члена. На более высоких частотах и больших глубинах это соотношение еще больше. Поэтому в дальнейшем мы опустим первый член в правой части. В этом случае формула (120) приобретает более

простой вид

$$P = \rho h \ddot{x}_h. \quad (121)$$

Таким образом, для расчета амплитуды давления по формуле (121) необходимо знать амплитуду колебательного ускорения в точке расположения гидрофона. Однако вместо колебательного ускорения частиц жидкости в точке расположения гидрофона (\ddot{x}_h) в формуле (121) может быть использовано ускорение дна

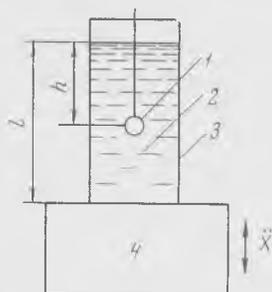


Рис. 59. Градуировка с помощью вибрирующего столба жидкости

1 — гидрофон; 2 — вода; 3 — сосуд; 4 — вибростол

сосуда (\ddot{x}_l), связанное с величиной \ddot{x}_h простым соотношением

$$\ddot{x}_h = \ddot{x}_l \frac{\cos \frac{\omega h}{c}}{\cos \frac{\omega l}{c}}, \quad (122)$$

где l — общая длина столба жидкости в сосуде; c — скорость звука в жидкости, заполняющей сосуд с учетом податливости стенок сосуда. Величина \ddot{x}_l может быть измерена с помощью градуированного акселерометра, прикрепляемого ко дну сосуда, либо рассчитана по амплитуде смещения дна, измеренной одним из оптических методов. Если для измерения величины \ddot{x}_l используют градуированный акселерометр, то чувствительность гидрофона в вольтах на единицу давления может быть вычислена по формуле:

$$M = \left(\frac{U_h}{U_a} \right) \left(\frac{S_a}{\rho h} \right), \quad (123)$$

где U_h и U_a — напряжения на выходе гидрофона и акселерометра соответственно; S_a — чувствительность акселерометра (в вольтах) на единицу ускорения.

Присутствие гидрофона в воде искажает характер движения жидкости. Это приводит к тому, что давление жидкости на стенки гидрофона, вообще говоря, отличается от того, которое имело бы место в жидкости при отсутствии гидрофона. Разность давлений может быть записана в виде:

$$\Delta P = \rho C_1 \dot{x}_h^2 + \rho C_2 \ddot{x}_h, \quad (124)$$

где C_1 и C_2 — коэффициенты, соответствующие стационарному и ускоренному движениям жидкости. Значение этих коэффициентов меняется в зависимости от положения точки на поверхности гидрофона и от формы его. Эти коэффициенты хорошо известны в гидродинамике для простых форм, но неизвестны для большинства сложных форм гидрофонов. Например, в случае сферы радиуса a коэффициент C_1 не более чем $4/5$, а C_2 не более чем $a/2$ для шума. Оценка показывает, что в этом случае $\Delta P \ll P$, если $h \gg a \gg x_0$. Здесь x_0 — амплитуда колебательного смещения частиц жидкости. Это условие означает, что ΔP пренебрежимо мало по сравнению с P , если поперечный размер гидрофона сферической формы много меньше, чем глубина погружения, и много больше, чем амплитуда вибраций. Практика показывает, что это же условие справедливо и для гидрофонов более сложных форм, чем сферическая.

Рабочий диапазон частот метода простирается от единиц герц до 700—800 гц. Низкочастотная граница определяется условием пренебрежения первым членом в правой части соотношения (120). Вообще говоря, если не пренебрегать первым членом, то можно считать, что рабочий диапазон частот метода начинается от 0. При $f \rightarrow 0$, $\dot{x} \rightarrow 0$, $p = \rho g x$ и мы переходим к обычному гидростатическому методу градуировки. На высоких частотах, когда высота столба жидкости сравнима с длиной звуковой волны, оказываются существенными волновые явления. В этом случае в формулу (121) необходимо вводить волновую поправку. С учетом волновой поправки формула (121) запишется в виде:

$$P = \rho h \dot{x}_h \cdot \frac{\operatorname{tg} \left(\frac{\omega h}{c} \right)}{\frac{\omega h}{c}}. \quad (125)$$

Представляя \dot{x}_h через \dot{x}_l , соотношение (125) можно переписать:

$$P = \rho h \dot{x}_e \frac{\sin \frac{\omega h}{c}}{\frac{\omega h}{c} \cos \frac{\omega e}{c}}. \quad (126)$$

С учетом волновой поправки расчетная формула (123) перепишется в виде:

$$M = \left(\frac{U_h}{U_a} \right) \left(\frac{S_a}{\rho_h} \right) \frac{\left(\frac{\omega h}{c} \right) \cos \frac{\omega l}{c}}{\sin \frac{\omega h}{c}}. \quad (127)$$

Все приведенные выше расчетные формулы справедливы при выполнении условия несжимаемости гидрофона.

При практическом использовании описанного метода необходимо знать точное положение чувствительного элемента в гидрофоне. Если оно неизвестно, его можно определить, строя график

зависимости выходного напряжения гидрофона от глубины погружения произвольной его точки на фиксированной низкой частоте и постоянном ускорении. Затем производят экстраполяцию кривой до нулевого значения выходного напряжения и определяют положение чувствительного элемента относительно выбранной произвольной точки.

Экспериментальную проверку описанного метода проводили в диапазоне частот от 10 до 700 гц. В опытной установке использовали сосуд с водой диаметром около 16 см и высотой около 51 см. Гидрофон погружали в воду в подвешенном состоянии. Результаты градуировки описанным методом сравнивали с результатами градуировки в свободном поле. Расхождение результатов не превышало 0,5 дб.

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ И ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА БИОАКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ. ОЦЕНКА ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ

1. Самописцы уровня

Самописец уровня представляет собой электронный мост, самобалансирующийся благодаря электромеханической отрицательной обратной связи. Блок-схема самописца изображена на рис. 60. Измеряемое переменное напряжение U_1 подается на вход аттенюатора (1). Напряжение U_2 с выхода аттенюатора поступает на функциональный делитель (2). Напряжение U_3 , снимаемое ползунком с функционального делителя, усиливается усилителем переменного тока (3), выпрямляется выпрямителем (4) и поступает на согласующий делитель (5), куда подается также и опорное напряжение с источника опорного напряжения (8).

Напряжение с согласующего делителя, представляющее собой разность выпрямленного и опорного напряжений, усиливается усилителем постоянного тока (6) и поступает на обмотку подвижной системы серводвигателя (7). Если разность выпрямленного и опорного напряжений равна нулю, то в обмотке ток отсутствует, и подвижная система находится в состоянии равновесия. Если же выпрямленное напряжение отличается от опорного, то в обмотке протекает ток, и подвижная система перемещается. Однако, будучи жестко связанной с ползунком функционального делителя, подвижная система серводвигателя при своем перемещении передвигает ползунок делителя, в результате чего на входе усилителя переменного тока меняется уровень сигнала ровно настолько, чтобы разность выпрямленного и опорного напряжений вновь стала равной нулю. Так осуществляется электромеханическая отрицательная обратная связь, непрерывно балансирующая подвижную систему. При этом линия, вычерчиваемая иглой на перемещающейся бумаге (9), в заданном масштабе изображает величину записываемого напряжения в зависимости от времени. Вследствие непрерывного уравнивания выпрямленного и опорного напряжений происходит автоматическая стабилизация напряжения на входе усилителя переменного тока. От этого напряжения зависит нулевой уровень (значение напряжения, соответствующее начальной отметке шкалы).

Самописец снабжается сменными функциональными делите-

Таблица 5

Тип прибора, изготовитель	Диапазон частот, вГц	Динамический диапазон (сменные потенциометры) дБ линейный, мВ	Входное сопротивление, тыс.ом	Минимальный входной сигнал, мВ	Количество положений регулятора и скорость, мм/сек		Фитрация низких частот, пп	Погрешность
					записи	движения бумаги		
Н110, СССР	0—0,005	25 50 75 10—110	40	10	9 положений, 50— 1000	10 положений, 0,003—100		$\pm 0,5$ дБ ± 1 дБ $\pm 1,5$ дБ $\pm 5\%$ длины шка- лы
	0—200	10 25 50 75 10—35 мВ 11—110 мВ	18	10	45 положений, 2— 2000	12 положений, 0,0003—100		0,5 дБ при 75 дБ
	0,025—200	25 50 75	7—20	10	5 положений, 150— 1000	4 положения, 0,1—50	25 100 200	1,5 дБ при 75 дБ

2. Магнитная запись звука

Магнитная запись основана на способности ферромагнитных материалов приобретать и сохранять остаточную намагниченность в результате воздействия внешнего магнитного поля. На рис. 62 показана функциональная схема тракта звукопередачи при магнитной записи и последующем воспроизведении звука. Микрофон (1), расположенный в звуковом поле, преобразует звуковой сигнал в электрический. Электрический ток, изменяющийся со зву-

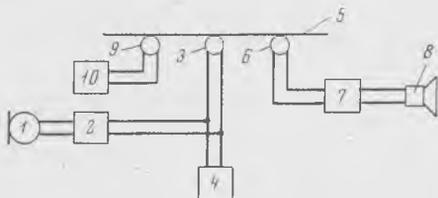


Рис. 62. Функциональная схема тракта звукопередачи при магнитной записи

ковой частотой, после усиления усилителем (2) подводится к магнитной записывающей головке (3). Головка записи представляет собой электромагнит, кольцевой сердечник которого из ферромагнитного материала имеет немагнитный зазор. Проходящий по обмотке головки ток создает в сердечнике магнитный поток, величина которого пропорциональна числу ампервитков головки. Вблизи зазора головки часть магнитного поля замыкается по воздуху с внешней стороны сердечника. Эта часть магнитного потока головки и образует записывающий элемент, воздействующий на носитель записи (5). Магнитное поле головки записи изменяется по величине и направлению в соответствии с записываемым сигналом. Одновременно с током записываемого сигнала в обмотке головки протекает так называемый ток подмагничивания (переменный или постоянный) от специального генератора (4), назначение которого обеспечить предварительное намагничивание носителя записи, необходимое для того, чтобы создать условия получения высококачественной записи. Ток подмагничивания должен в несколько раз превышать ток полезного сигнала.

Носитель, имеющий форму ленты или проволоки из ферромагнитного материала, равномерно продвигается, плотно прилегая к поверхности записывающей головки в области зазора. Участок носителя, расположенный в магнитном поле головки записи, намагничивается и, выходя за пределы поля, сохраняет остаточную намагниченность.

Сигнал с магнитной фонограммы воспроизводит следующим образом. Носитель с магнитной фонограммой движется с постоянной скоростью, равной скорости при записи относительно воспроизводящей головки (6). Воспроизводящая головка, подобно записывающей, представляет собой незамкнутый ферромагнитный сердечник с обмоткой. При соприкосновении головки воспроизведения с носителем внешний магнитный поток фонограммы замы-

кается через ферромагнитный сердечник, так как магнитное сопротивление последнего мало по сравнению с сопротивлением воздуха и немагнитного зазора. При движении фонограммы поле в сердечнике головки воспроизведения изменяется, и в обмотке головки индуцируется электродвижущая сила в соответствии с изменениями магнитного поля фонограммы. После усиления усилителем (7) электрический сигнал, получаемый в цепи головки воспроизведения, подводится к громкоговорителю (8).

Стирание записи фонограммы производится с помощью специальной стирающей головки (9), в обмотке которой для этого пропускают переменный ток стирания от специального генератора (10).

Система магнитной записи звука имеет следующие достоинства:

1) возможность немедленного воспроизведения сигнала с фонограммы после записи без какой-либо обработки носителя;

2) возможность многократного использования одного и того же носителя путем стирания ранее записанной фонограммы.

Однако магнитная запись имеет и некоторые недостатки, приводящие к искажениям записываемого сигнала. К числу таких искажений прежде всего относятся: детонации, копираэффект и нелинейные искажения.

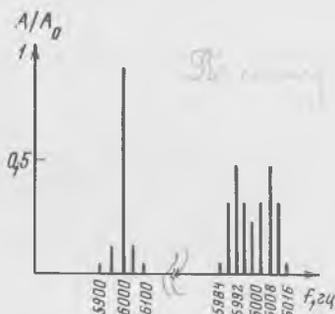
Детонациями называются искажения сигнала, обусловленные периодическими изменениями скорости движения носителя вследствие несовершенства механической системы магнитофона. Детонации изменяют спектр сигнала, но и по своей физической сущности и по восприятию эти искажения отличны от нелинейных. При детонациях возникает паразитная частотная модуляция сигнала, которая по-разному воспринимается на слух в зависимости от частоты колебаний скорости. Если происходят медленные изменения скорости с частотой ниже 4 ÷ 5 гц, детонации воспринимаются как плавное изменение высоты тона, как говорят «звук плавает». При частотах детонации 5 ÷ 16 гц характер восприятия изменяется, возникает эффект тремолирующего, дрожащего звука, напоминающего звук гавайской гитары. Когда частота детонаций лежит в диапазоне звуковых частот, ухо человека уже не ощущает изменений высоты тона, а воспринимает детонации как изменение тембра звука в виде хриплости и своеобразной жесткости звучания. Если частота детонаций превышает 1000 гц, то она воспринимается в виде характерного шипения, сопровождающего сигнал.

Исходя из восприятия детонаций, установили величину допустимого значения детонации — 0,2%. На рис. 63 показаны спектры сигналов при детонациях в двух случаях: при изменениях скорости с частотами 4 и 50 гц. Как видно, спектр сигнала изменяется больше при низкой частоте колебаний скорости. Эти искажения спектра можно обнаружить при узкополосном спектральном анализе. Если же проводится спектральный анализ при достаточно широкой полосе фильтра (октавная, полуоктавная,

третьоктавная или полоса в несколько процентов анализируемой частоты), то детонация практически не скажется на результатах спектрального анализа биоакустической информации.

При воспроизведении сигнала с магнитной фонограммы иногда прослушиваются слабые повторные сигналы. Причиной их появления является так называемый копирэффekt. Сущность его заключается в том, что магнитное поле, окружающее намагниченные участки фонограммы, воздействует на соседние слои маг-

Рис. 63. Спектры сигналов при детонациях



нитой ленты, смотанной в рулон. В результате слои ленты, прилегающие к участку фонограммы, частично намагничиваются этим полем, на них образуются «магнитные отпечатки» записанного сигнала. При воспроизведении фонограммы «магнитные отпечатки» создают паразитные сигналы, имеющие форму опережающего и запаздывающего эхо основного сигнала. Характерная особенность копирэффекта — зависимость уровня эхо-сигнала от времени хранения ленты после записи. С увеличением времени хранения уровень копирэффекта возрастает.

Нелинейные искажения при магнитной записи могут возникнуть из-за магнитной нелинейности головки записи и магнитной нелинейности носителя. Однако в современных магнитофонах величина нелинейных искажений может быть сделана достаточно малой (1—3%).

Одна из основных методических проблем, стоящих перед исследователями, изучающими такие биологические объекты, как рыбы, китообразные и ластоногие, заключается в получении информации о параметрах их жизнедеятельности вообще и о биоакустических параметрах в частности в условиях естественного обитания или близких к таковым. В литературе описаны телеметрические устройства (Diercks a. oth., 1971; Романенко и др., 1974; Янов, Романенко, 1972), позволяющие решать эту задачу. Но каждое из таких устройств обладает своими недостатками: использование кабельной связи для передачи информации сковывает движения животного, передача информации по радиоканалу сопряжена с известными сложностями ее кодирования и декодирования. Кроме того, радиус действия в этом случае весьма ограничен. В конечном же итоге для регистрации информации

служит, как правило, магнитофон. Поэтому возникает вопрос, нельзя ли обойтись без каналов передачи информации и регистрировать информацию, поступающую с датчиков, непосредственно на магнитофон, размещаемый на изучаемом объекте. Существующие системы магнитофонов не приспособлены к такому применению: они не герметизированы, имеют, как правило, большие габариты и вес, имеют в большинстве случаев недостаточно широкий диапазон рабочих частот.

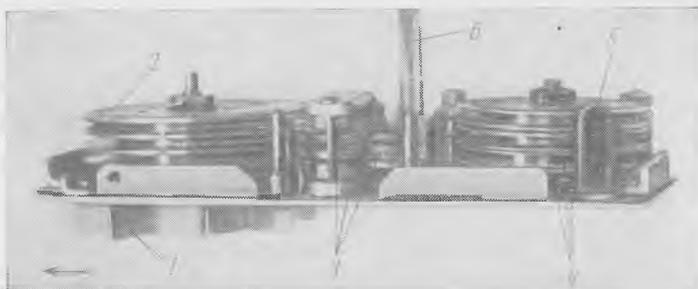


Рис. 64. Механизм протяжки звуконосителей (первый вариант)

В лаборатории биоакустики Института эволюционной морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова АН СССР разработаны два варианта трехканального магнитофона, закрепляемого непосредственно на животном и предназначенного для записи под водой полезной информации прямо с датчиков в полосе частот от 100 гц до 120 кгц; запись производят одновременно на три стандартные проволочные звуконосителя с помощью трех стандартных записывающих головок (Романенко, Чикалкин, 1974).

Первый вариант магнитофона выполнен максимально облегченным и экономичным. Характерной его особенностью является то, что механизм протяжки звуконосителя в нем не герметизирован и свободно промывается водой. Кроме того, он не имеет электродвигателя, а протяжка осуществляется с помощью турбины, приводимой во вращение набегающим потоком воды. Это позволило создать конструкцию, вес которой в воздухе вместе с тремя датчиками полезной информации, усилителями записи и источниками питания усилителей не превышает 1 кг. Емкость каждой из трех кассет, заряжаемых в магнитофон, составляет около 1500 м проволочного звуконосителя. Время непрерывной записи при скорости записи 2—3 м/сек около 10 мин.

Недостатком этого варианта магнитофона является то, что он работает только в том случае, если животное движется. Поэтому он может быть применен лишь в решении тех задач, которые так или иначе связаны с движениями животного. На рис. 64 показан механизм протяжки звуконосителей. Механизм работает следующим образом. Набегающий поток воды (при движении жи-

вотного) вращает турбину (1). На рис. 64 направление потока показано стрелкой. Турбина полуприкрыта крышкой (на рисунке не показана) для того, чтобы поток воды воздействовал только на лопасти, выступающие из-под крышки. Турбина вращает трехсекционную приемную кассету (2), которая наматывает на себя звуконосители, протаскивая их относительно рабочих зазоров головок записи (3). При этом три подающие кассеты (4) слегка подтормаживаются поролюновыми наклейками на стойках (5), создавая необходимое натяжение звуконосителей. По экранированным проводам (6) к головкам поступает записываемый сигнал. В рабочем состоянии весь механизм прикрыт крышкой (на рисунке не показана) для предотвращения от механических повреждений. Крышка перфорирована так, что вода свободно проникает в механизм. Ввиду того что звуконосители и головки записи изготовлены из некоррозирующих материалов, кратковременное пребывание их даже в морской воде не приводит к ухудшению качества записи.

Термин «трехканальный магнитофон», примененный по отношению к описываемому магнитофону, не совсем удачен. Точнее магнитофон следовало бы назвать «строеным», так как в одной компоновке смонтировано три магнитофона, имеющих единую систему протяжки звуконосителей.

На рис. 65 показана блок-схема усилителей записи. Полезные сигналы с датчиков поступают на входы трех идентичных усилителей напряжения (У1, У2 и У3), затем на входы сумматоров (С1, С2 и С3), на которые подается также один и тот же синусоидальный опорный сигнал с генератора (Г). В сумматоре полезный и опорный сигналы линейно суммируются и далее усиливаются усилителями мощности (УМ1, УМ2 и УМ3). Подмагничивание осуществляется постоянным током. Схемы питаются от стабилизирован-

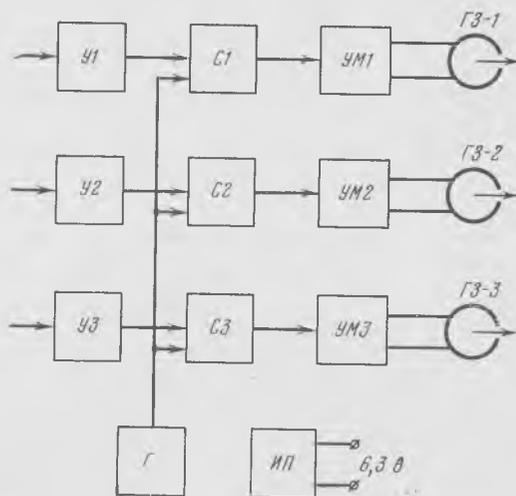


Рис. 65. Блок-схема усилителей записи

ного источника (ИП). Назначение опорного сигнала состоит в том, чтобы синхронизировать записи полезных сигналов на трех независимых звуконосителях. Кроме того, опорный сигнал, частота которого постоянна и известна, позволяет достаточно точно определять скорость записи каждого участка фонограммы при известной скорости воспроизведения. Дело в том, что скорость протяжки звуконосителя, определяемая скоростью набегающего потока воды, вообще говоря, непостоянна и зависит от скорости пла-

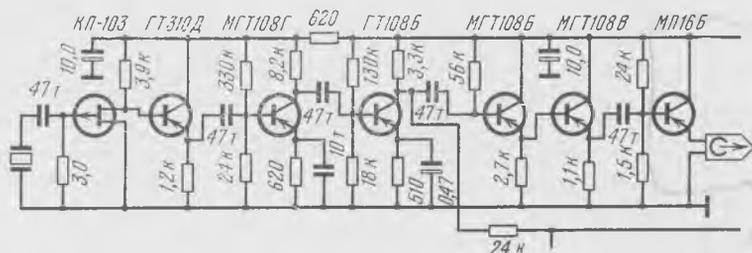


Рис. 66. Принципиальная схема одного из усилителей записи

вания животного. Уровень опорного сигнала составляет 2—3% от максимального уровня полезного сигнала.

На рис. 66 приведена принципиальная схема одного из усилителей записи. Первые четыре каскада схемы представляют собой усилитель напряжения, каскад 5 выполняет роль сумматора полезного и опорного сигналов, каскады 5—7 усиливают сигнал по мощности. Головки записи (ГЗ) включены непосредственно в эмиттерные цепи оконечных каскадов. В этом случае постоянные составляющие тока оконечных каскадов обеспечивают подмагничивание звуконосителей, а переменная составляющая обеспечивает запись полезного сигнала.

На рис. 67 приведена принципиальная схема *RC* генератора опорного сигнала. Частота опорного сигнала 1230 гц.

Источником питания всех трех усилителей записи и генератора служат две последовательно соединенные батареи дисковых аккумуляторов типа 7Д-01.

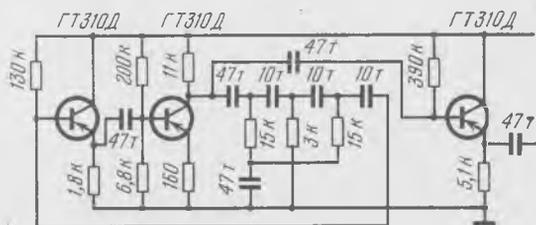


Рис. 67. Принципиальная схема *RC* генератора опорного сигнала

Как уже указывалось ранее, этот вариант магнитофона разработан максимально упрощенным. Он неуправляем в процессе работы. Скорость записи непостоянна. Перечисленные недостатки отсутствуют у второго варианта магнитофона. Второй вариант отличается от первого, во-первых, наличием электродвигателя, что обеспечивает возможность работы с неподвижным животным, во-вторых, наличием системы дистанционного управления по радио работой магнитофона. Последнее обстоятельство позволяет

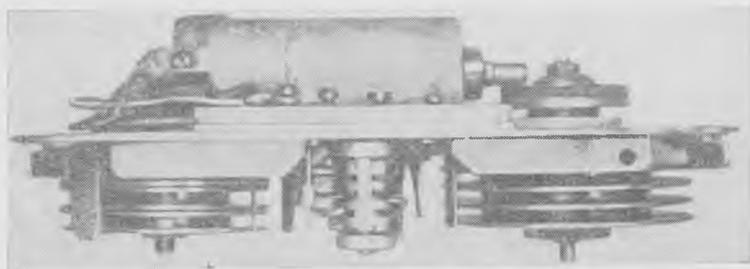


Рис. 68. Второй вариант магнитофона

вести запись не всей информации, а выборочно, по желанию экспериментатора, в нужные моменты времени. В промежутках между интервалами записи вся система находится в дежурном экономичном режиме и готова к включению по радиокоманде экспериментатора. В той конкретной конструкции магнитофона, которая была испытана и применялась в биоакустических исследованиях дельфинов, длительность дежурного режима составляла 4—5 час., но легко могла быть доведена до суток. Кинематическая схема второго варианта магнитофона ничем не отличается от первого варианта, только вместо турбины, приводимой во вращение набегающим потоком воды, применен электродвигатель типа ДПМ-25 с фрикционным редуктором, согласующим обороты двигателя и ведущей трехсекционной кассеты. На рис. 68 показан второй вариант магнитофона, отличающийся наличием электродвигателя. Применение электродвигателя позволило увеличить скорость протяжки звуконосителей до 4 м/сек и тем самым улучшить качество записи.

Усилители записи использованы такие же, как и в предыдущем варианте. Электронная часть магнитофона дополнена схемой дистанционного управления включением питания электродвигателя и усилителей записи, а также схемой реле времени, задающего время работы магнитофона после включения.

На рис. 69 приведена полная принципиальная схема электронной части второго варианта магнитофона. В этом варианте магнитофона усилитель записи первого канала используют не толь-

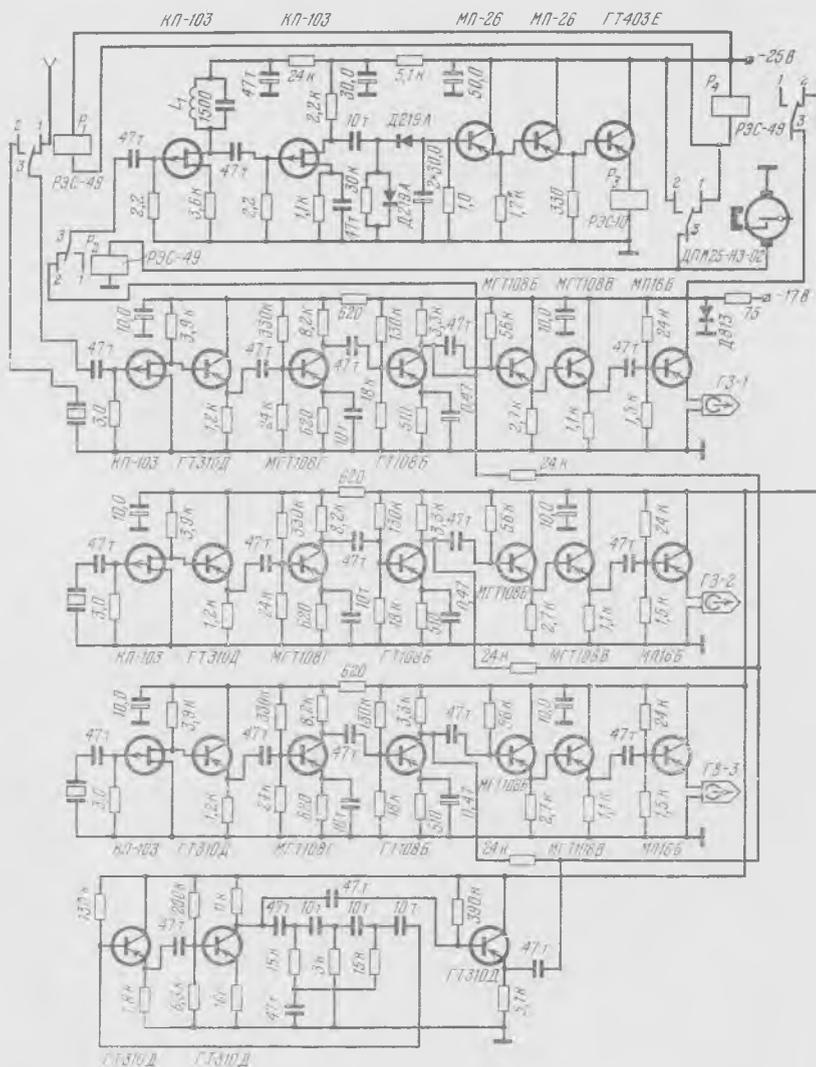


Рис. 69. Принципиальная схема второго варианта магнитофона

ко для усиления полезной биоакустической информации в периоды записи, но также для усиления сигналов радиокоманд в промежутках между записями (в дежурном режиме). С этой целью ко входу усилителя попеременно подключают приемную антенну схемы дистанционного управления в дежурном режиме и датчик полезной информации (гидрофон при биоакустических из-

мерениях) в период записи. Переключение антенны и гидрофона осуществляет электромеханическое реле P_1 . Выход 4-го каскада усилителя с помощью реле P_2 подключается попеременно либо ко входу схемы реле времени в дежурном режиме, либо к выходным каскадам и головке записи в рабочем режиме. Схема дистанционного управления магнитофоном включает помимо усилителя записи первого канала (в дежурном режиме) еще следующие узлы: резонансный усилительный каскад и реостатный каскад.

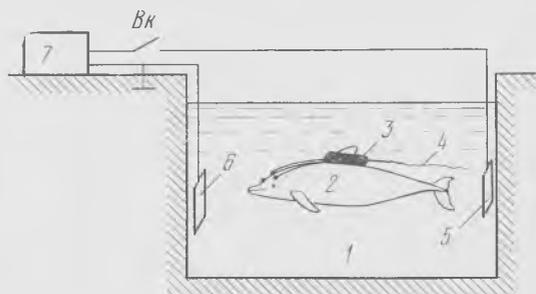


Рис. 70. Схема эксперимента

Резонансный каскад усиливает избирательно радиокомандный сигнал с частотой 150 кгц. Реостатный каскад дополнительно усиливает командный сигнал и является источником сигнала для детектора Д219А, выход которого подключен ко входу составного эмиттерного повторителя. Детектор с эмиттерным повторителем составляет реле времени. В эмиттерную цепь включена обмотка электромеханического реле P_3 , через контакты которого подводится питание к электродвигателю ДПМ-25.

Схема эксперимента с применением дистанционного управления работой магнитофона показана на рис. 70. В водоеме (1) плавает дельфин (или другое животное) 2, на котором укреплен магнитофон (3) со схемой дистанционного управления, ко входу которой подключена приемная антенна (4). В воде водоема расположена излучающая антенна (5) в виде металлической пластины, находящейся в электрическом контакте с водой, и заземленная пластина (6). Излучающая антенна подключена к генератору (7) через ключ (Вк). В нужный момент времени замыкают ключ Вк и на пластину (5) подают напряжение с частотой 150 кгц и амплитудой в несколько вольт. К этому моменту времени схема магнитофона включена в дежурный режим. При включении радиокомандного сигнала в воде водоема создается радиотокое поле, которое вызывает в приемной антенне электрическое напряжение той же частоты и вполне достаточной величины для срабатывания схемы включения магнитофона. Включается протяжка звуконосителей. Следует отметить, что таким способом может быть достигнута уверенная связь между излучающей и приемной антеннами, если они разнесены на расстояние в несколько десятков метров. Длительность записи определяется электронным реле

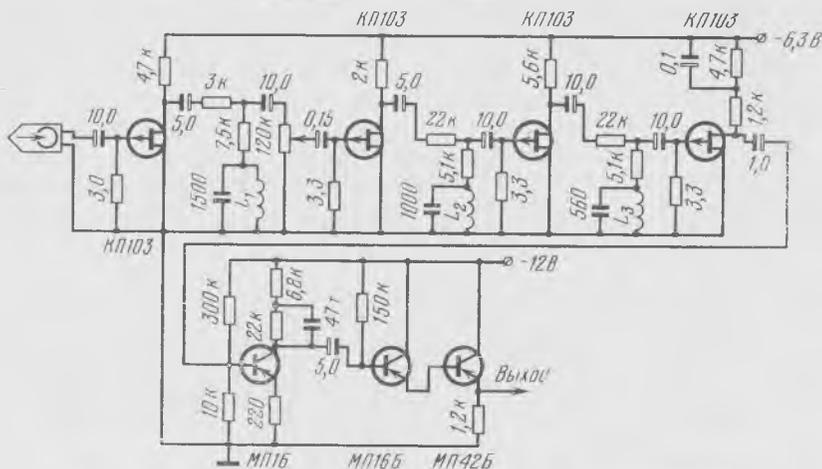


Рис. 71. Принципиальная схема усилителя воспроизведения

времени, которое выключает двигатель по истечении заданного времени. Вся схема вновь переходит в дежурный режим.

Чувствительность схемы дистанционного управления 300 мкв, время рабочего режима 8 сек., оно регулируется при наладке в широких пределах.

Воспроизведение записанных фонограмм осуществляют на усовершенствованном магнитофоне МН-61 с транспонированием в 2—2,5 раза в область низких частот. Усовершенствование состоит в том, что в магнитофоне МН-61 используют специально разработанный усилитель воспроизведения с низкочастотной и высокочастотной коррекцией, позволяющими без искажений воспроизводить записанную информацию в полосе частот до 40—60 кгц, что соответствует реальной полосе частот до 100—150 кгц. На рис. 71 приведена принципиальная схема усилителя воспроизведения. Высокочастотную коррекцию осуществляют RL элементы, низкочастотную — RC элементы.

Как уже говорилось выше, в магнитофоне применено подмагничивание звуконосителей постоянным током в целях упрощения схемы. Это несколько сужает динамический диапазон записи, который в данном случае составляет всего 30—35 дб. Однако наличие в единой компоновке трех магнитофонов позволяет при желании регистрировать сигналы в динамическом диапазоне примерно в 100 дб. Для этого датчики полезной информации (например, гидрофоны) должны быть расположены максимально близко друг к другу с тем, чтобы регистрировать сигнал практически в одной точке (лучше даже один датчик присоединить сразу с трем каналам записи), а коэффициенты усиления усилителей записи долж-

ны быть установлены такими, чтобы втрое перекрыть динамический диапазон одного канала записи. Тогда на одном звуконосителе будут записаны самые слабые сигналы (сильные же сигналы будут искажены). На другом будут записаны средние сигналы, а на третьем — сильные (слабые и средние сигналы на третьем звуконосителе при этом будут записаны слабо).

Описанный магнитофон может быть применен для регистрации не только биоакустической информации. С еще большим успехом он может регистрировать биогидродинамическую (а также физиологическую) информацию, которая не столь широкополосна, как биоакустическая, и, следовательно, не требует высокой скорости записи.

3. Спектральный анализ

Практически все современные приборы, применяемые для биоакустических измерений, используют преобразование акустических величин (главным образом давления) в пропорциональные им по величине и соответствующие по частоте значения электрического напряжения и тока. Несмотря на различную специфику биоакустических и радиотехнических измерений, приборы для спектрального анализа в настоящее время являются чисто радиотехническими. Спектральный анализ биоакустических сигналов, таким образом, заменяется спектральным анализом соответствующих им электрических сигналов (Клюкин, Колесников, 1968).

Спектральным анализом называется определение амплитуд и частот колебаний, входящих в состав сложного сигнала. Анализ может быть подробным, когда выявляются элементарные частотные составляющие сигнала (например, отдельные гармонические колебания в периодических сигналах), и общим, когда выявляется роль отдельных частотных участков в общем спектре сигнала. Спектральный анализ сложного колебания бывает последовательным и одновременным. При последовательном анализе картина спектра получается в результате многократного исследования сигнала с помощью одного частотно-избирательного элемента (фильтра), изменяющего свои параметры, или с помощью ряда избирательных элементов, подключаемых поочередно. При одновременном анализе используют набор фильтров, включаемых параллельно таким образом, чтобы одновременно получить на выходах фильтров все составляющие исследуемого колебания. Работа каждого из фильтров при одновременном анализе аналогична работе фильтра при последовательном анализе. При одновременном анализе имеется возможность визуально наблюдать полную картину спектра сложного сигнала. Для этого широко применяются электронные спектрометры, с экранов электронно-лучевых трубок которых можно получать фотографию спектра исследуемого процесса.

Приборы любого типа, в которых перестройка или переключение фильтра производится вручную, называются анализаторами гармоник. Автоматизированные приборы для анализа носят название спектрометров.

Анализирующие свойства каждого фильтра характеризуются коэффициентом передачи, шириной полосы пропускания частот и крутизной спада частотной характеристики. Анализирующие свойства всего прибора в целом характеризуются, кроме того, разрешающей способностью, динамическим диапазоном и временем анализа.

Потери сигнала, проходящего через фильтр, определяются численным значением коэффициента передачи фильтра. Коэффициент передачи есть отношение сигнала на выходе фильтра к сигналу на входе. В случае анализа с помощью набора фильтров важно, чтобы коэффициент передачи всех фильтров имел одно и то же значение, иначе при анализе реальные соотношения между отдельными частотными участками будут искажены. Абсолютная величина коэффициента передачи учитывается при градуировке тракта.

Ширина полосы пропускания фильтра (часто используется термин «полоса прозрачности») определяется разностью высшей и низшей частот, на которых коэффициент передачи фильтра снижается до уровня 0,707 от своего значения в полосе прозрачности. Такое определение вызвано тем, что реальная частотная характеристика любого фильтра существенно отличается от прямоугольной характеристики идеального фильтра (рис. 72). Как видно из рисунка, отличие наблюдается не только в полосе прозрачности, где характеристика реального фильтра обычно не является совершенно ровной, но и вне полосы прозрачности, где коэффициент передачи реального фильтра отличен от нуля.

Крутизна спада частотной характеристики фильтра определяет степень воздействия частотных составляющих анализируемого сигнала, находящихся вне полосы прозрачности, на значение выходного сигнала. Очевидно, это воздействие, приводящее к искажению спектра, будет тем больше, чем менее крутым будет спад частотных характеристик фильтров. Особенно сильно крутизна спада влияет на точность анализа, если сигналы в различных частотных участках существенно отличаются один от другого по амплитуде. Например, на рис. 72 составляющие спектра сигнала A_1 и A_2 сильно отличаются друг от друга, причем $A_2 > A_1$. Составляющая A_1 передается фильтром без изменений (предположим, что коэффициент передачи фильтра в полосе прозрачности $K = 1$), а составляющая A_2 уменьшится до величины A_3 (ввиду того, что за пределами полосы прозрачности $K < 1$) и сложится энергетически с составляющей A_1 . При этом на выходе фильтра будет уже не A_1 , а $\sqrt{A_1^2 + A_3^2} > A_1$. Величина $(\sqrt{A_1^2 + A_3^2} - A_1)$ будет абсолютной погрешностью анализа.

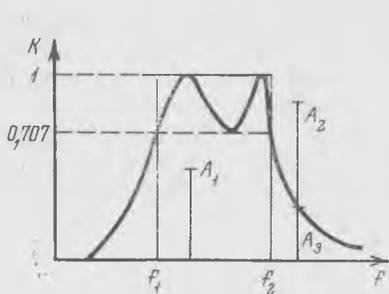


Рис. 72. Частотные характеристики идеального и реального фильтров

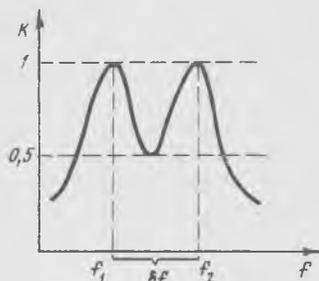


Рис. 73. Коэффициент передачи анализатора в функции частоты

Разрешающей способностью анализатора называется его способность раздельно обнаруживать смежные частотные составляющие сигнала. Она определяется частотным интервалом, при котором две смежные частотные составляющие разделяются с провалом на спектрограмме, достигающим 50% от максимального значения (рис. 73). Большой разрешающей способностью обладает анализатор, у которого указанный частотный интервал будет уже. Разрешающая способность зависит от параметров фильтра и скорости анализа. Под скоростью анализа понимается скорость перестройки фильтра в исследуемом частотном диапазоне. Наибольшей разрешающей способностью анализатор обладает в статическом режиме, т. е. когда фильтр не перестраивается в процессе измерений. Для простого анализирующего элемента — достаточно добротного колебательного контура — разрешающая способность в статическом режиме может быть определена выражением

$$\delta f \approx 4\Delta f, \quad (128)$$

где Δf — ширина полосы прозрачности контура.

Увеличение скорости анализа вызывает снижение разрешающей способности прибора. Однако в случае правильного выбора скорости анализа в соответствии с шириной полосы пропускания изменение разрешающей способности анализатора сравнительно со статической невелико и можно с ним не считаться.

Время анализа определяется из длительности процесса установления колебаний в фильтре-резонаторе, которая связана с шириной полосы анализа Δf соотношением

$$\Delta t \cdot \Delta f = A, \quad (129)$$

где A — некоторая постоянная. Если за Δt принять время, в течение которого исследуемый сигнал в фильтре нарастает до 0,99 от своего установившегося значения, то $A = 1,5$. Для слу-

чая нарастания сигнала в фильтре до 0,95 от установившегося значения $A = 1$. Отметим, что наименьшим значением A обладает фильтр, характеристика которого имеет колоколообразную форму. Такие фильтры называются Гауссовыми фильтрами.

При использовании последовательных анализаторов с плавным равномерным изменением частоты анализа и в случае анализа сигналов, имеющих дискретный спектр, скорость анализа v находят из выражения:

$$v \leq \frac{\Delta f}{4}. \quad (130)$$

Отсюда время анализа всего спектра будет равно

$$t = \frac{f_2 - f_1}{v} \geq \frac{4(f_2 - f_1)}{\Delta f^2}, \quad (131)$$

где f_2 и f_1 — граничные частоты исследуемого диапазона.

При анализе случайных процессов время анализа при постоянной полосе пропускания равно

$$t \geq \frac{4B(f_2 - f_1)}{\delta^2 \Delta f^2} \quad (132)$$

и при постоянной относительной полосе пропускания равно

$$t \geq \frac{4BQ^2}{\delta^2 f_1}. \quad (133)$$

Здесь B — постоянная, зависящая от вида фильтра, способа детектирования и интегрирования анализируемого сигнала. Она может изменяться в пределах 0,04—1; δ — относительная среднеквадратичная погрешность; $Q = f_0/\Delta f$ — добротность анализатора. Как видно, время, необходимое для анализа случайных процессов, оказывается значительно больше, чем время анализа сигналов, содержащих набор дискретных частот. Формула (133) справедлива только при условии, что постоянная интегрирования анализатора изменяется одновременно с изменением средней частоты.

Динамический диапазон анализатора или спектрометра определяется отношением максимального и минимального значений гармонических составляющих в рабочем диапазоне частот прибора.

В настоящее время выпускаются анализаторы и спектрометры следующих основных типов:

— набор фильтров со ступенчатым переключением. Такая система осуществляет последовательный анализ. Фильтры выполняются с постоянной относительной шириной полосы пропускания, большей частью кратной долям октавы (октавные, полуоктавные и третьоктавные);

— фильтровые спектрометры с автоматическим переключением, предназначенные для осуществления последовательного и

Таблица 6

Технические данные анализаторов и спектрометров

Прибор и марка	Изготовитель	Метод анализа	Частотный диапазон, гц	Ширина полосы анализа	Тип индикатора
Полуоктавный фильтр ПФ-1	СССР	Последовательный	50—40 000	Постоянная относительная полуоктавная	Стрелочный прибор
Октавный анализатор 1419А	Фирма Марконн, Англия	То же	20—40 000	Постоянная относительная шириной в октаву	То же
Узкополосный анализатор 1401	То же	»	2,5—8000	Постоянная относительная, 3%	»
Анализатор	Фирма Марконн, Англия	»	20—46 000	Постоянная, 4 гц	»
Анализатор спектра АС-3	СССР	»	20—60 000	Постоянная относительная 1,5, 3 и 10%	»
Анализатор гармоник С-5-2	СССР	»	15000—20 000	Постоянная 200 гц и 3 кГц	»
Анализатор гармоник С-5-3	СССР	»	20—20 000	Постоянная, 6 и 150 гц	Стрелочный, выход на самописец
Анализатор спектра АСЧХ-4 (СК4-4-3)	СССР	»	20—20 000	Постоянная в поддиапазонах: 12, 60, 100 и 400 гц	Электронно-лучевая трубка
Камертонный гетеродинный анализатор АН-2	СССР	»	Поддиапазоны: 20—50 60—2000 100—5000 400—20 000 5—100	Постоянная, 1/2 гц	Выход на самописец
Анализатор спектра 2107	Фирма Brüel а. Кюгг, Дания	»	20—20 000	Постоянная относительная, от 6 до 29%	Стрелочный прибор и выход на самописец
Спектрометр 2412	То же	»	22—45 000	Постоянная относительная, треть октавы	Стрелочный прибор и выход на самописец
Сонаграф 7029-А	Фирма Kay Electric, США	»	5—16 000 с 6 поддиапазонами	2,8—600	Электротермическая бумага

одновременного анализа с постоянной относительной полосой пропускания. В качестве индикатора выхода используется электронно-лучевая трубка или же производится запись на логарифмический самописец уровней;

— гетеродинные спектрометры, обеспечивающие последовательный анализ с постоянной шириной полосы пропускания. Преобразование входных сигналов с помощью дополнительного генератора — гетеродина — позволяет обеспечить одинаковую ширину полосы пропускания во всем рабочем диапазоне частот, повышает избирательность, т. е. разрешающую способность прибора. В целях получения более узкой полосы пропускания иногда применяется двойное гетеродинирование. В качестве индикатора используется электронно-лучевая трубка, развертка которой работает синхронно с изменением частоты гетеродина.

В табл. 6 приведены основные технические данные некоторых широко используемых в измерительной практике анализирующих приборов.

Несколько слов следует сказать о сонографе производства американской фирмы Kay Electric. Это одна из наиболее удачных разработок для осуществления спектрального анализа сложных сигналов. Сонограф дает трехмерное представление спектра сигнала на электротермической бумаге. Электротермическая бумага покрыта специальным составом, который прожигается электроискровым пером в местах, соответствующих определенной спектральной плотности энергии сигнала. В результате плотность почернения бумаги характеризует спектральную плотность энергии сигнала. Вертикальная ось сонограммы представляет собой ось частот, горизонтальная — ось времени. Сонограф позволяет получать также двумерные спектры (спектральная плотность энергии сигнала в зависимости от частоты) в любой момент времени на временной оси. Это своего рода разрезы сонограммы по вертикали в любой момент времени. Кроме этого, сонограф позволяет получать огибающие сигнала (амплитуда сигнала в зависимости от времени). Время анализа сонографа равно 1,3 мин. На рис. 74 приведена фотография сонографа и его рабочих блоков.

В практике биоакустических измерений наиболее часто встречаются следующие виды сигналов:

— периодические сигналы сложной формы. Их спектр характерен наличием дискретных частотных составляющих. Примером таких сигналов могут служить свистовые сигналы дельфинов, звуки некоторых рыб и птиц;

— случайные стационарные сигналы, содержащие широкий набор частотных составляющих со случайными амплитудами и фазами. Такие шумовые сигналы образуются, в частности, при обтекании рыб и дельфинов, движущихся по инерции, при перемещении мелких зверьков в траве;

— сумма периодических и случайных сигналов. Это наиболее

распространенный вид реальных сигналов. Такие сигналы часто издают дельфины, рыбы;

— нестационарные сигналы. Это сигналы, изменяющиеся во времени. Типичным примером таких сигналов являются локационные сигналы дельфинов.

Вообще, практически все биоакустические сигналы следует считать нестационарными. Исследование нестационарных процессов осуществляется методом одновременного анализа с предварительной записью нестационарного сигнала на магнитную ленту. Анализ записи нестационарного процесса на магнитной ленте выполняется многократным воспроизведением исследуемого участка с последовательным анализом при каждом воспроизведении в новой полосе пропускания. Многократное воспроизведение исследуемого участка записи осуществляется путем склеивания в кольцо этого участка записи. Кольцо из магнитной ленты с записью исследуемого нестационарного процесса (например, одиночного импульса) при воспроизведении позволяет создать так называемый квазистационарный (почти стационарный) сигнал, аналогичный периодической последовательности исследуемого импульса. Известно, что огибающие спектра одиночного импульса и периодически повторяющегося импульса той же формы одинаковы, поэтому огибающая спектра импульса, многократно воспроизведенного с кольца, будет соответствовать спектру исследуемого одиночного импульса.

Запись на магнитную ленту нестационарных процессов обеспечивает наилучшие возможности их анализа. Однако точность анализа процессов, предварительно записанных на магнитную ленту, ниже, чем при непосредственном анализе, так как в настоящее время количественные характеристики магнитной записи не всегда обеспечивают необходимую точность измерений (особенно в области частот выше 10 кГц). Качество воспроизводимого сигнала при магнитной записи в значительной степени зависит от однородности магнитной ленты, стабильности механической части магнитофонона и даже от малых перекосов магнитной ленты при записи и воспроизведении. Таким образом, по мере возможности следует рекомендовать непосредственный анализ исследуемого сигнала.

Выбор между одновременным и последовательным анализом не имеет принципиального значения и определяется в основном целесообразным временем анализа и наличием аппаратуры, так как первый метод позволяет осуществить анализ за время установления сигнала в фильтре с наименьшей полосой пропускания, а второй требует значительно большего времени.

Выбор полосы пропускания фильтров при анализе определяется, как правило, целью исследования. Однако необходимо помнить, что для правильного выявления характера спектра полоса анализа должна быть не менее чем в 4 раза уже того спектрального участка, особенности которого исследуются.



Рис. 74. Общий вид сонографа (а) и его рабочих блоков (б) и (в)

Рис. 74 (окончание)



Остановимся кратко на некоторых моментах выбора анализирующего прибора для конкретных нужд экспериментатора¹. Большую роль в успешном решении этой задачи играет априорное знание вида измеряемого процесса: является ли он детерминированным (непрерывным или импульсным) или случайным (стационарным или нестационарным).

Периодическое колебание как пример детерминированного процесса может быть представлено с помощью ряда Фурье как сумма гармонических составляющих (Харкевич, 1962):

$$U(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\omega) \cos(n\omega t + \varphi_n). \quad (134)$$

Амплитудный спектр периодического колебания $A_n(\omega)$ — дискретный и определяет частотное распределение амплитуд гармоник. Для детерминированного импульсного процесса исчезает понятие гармонической составляющей и говорить о величине амплитуды процесса на какой-то конкретной частоте не представляется возможным. Поэтому вводится понятие спектральной плотности:

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (135)$$

¹ Эта часть параграфа написана Б. В. Солухой.

или

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (136)$$

Подынтегральная функция $A(\omega) e^{j\omega t} d\omega$ представляет собой отдельное, бесконечно малое слагаемое, т. е. колебание с бесконечно малой амплитудой. Если с помощью понятия спектральной плотности описать непрерывный гармонический процесс вида $U(t) = A \cos \omega_0 t$, то его спектральная плотность будет:

$$A(\omega) = A\delta(\omega - \omega_0), \quad (137)$$

где $\delta(\omega)$ — дельта-функция Дирака. Таким образом, при измерении непрерывного гармонического процесса идеальным анализатором спектральной плотности на его выходе должна получиться бесконечная спектральная линия. Реальный же анализатор даст на выходе пик конечной ширины, что следует учитывать при непосредственном сравнении спектров периодических и непериодических процессов. Исходя из приведенных соотношений, очевидно, что при аппаратурном определении амплитудного спектра и спектральной плотности основным элементом анализатора является система: «узкополосный фильтр — линейный детектор», поскольку сигнал на выходе линейного детектора пропорционален амплитуде входного сигнала (понятно, что при анализе спектральной плотности необходима также система деления сигнала на выходе детектора на ширину полосы узкополосного фильтра).

Иначе обстоит дело со случайными процессами. Если мы воспользуемся предыдущими выражениями и вычислим по реализации стационарного случайного процесса $U(t)$ величину

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) e^{-j\omega t} dt \quad (138)$$

или в реальном случае при длительности реализации T величину

$$S_T(\omega) = \int_0^T U(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (139)$$

мы получим текущую (за время T) спектральную плотность $U(t)$, которая является случайной величиной (Котюк и др., 1967). Естественно, что характеризовать случайный процесс случайной же величиной не имеет смысла. Стремление иметь в качестве определения спектра случайного процесса неслучайную функцию привело к появлению понятия энергетического спектра (Харкевич, 1962). Подойдем к его определению последовательно. Величина

$$\frac{1}{\pi} |S_T(\omega)|^2 \quad (140)$$

представляет собой текущий спектр энергии, выделяемой процессом за время T . Величина

$$\frac{1}{\pi} \frac{|S_T(\omega)|^2}{T} \quad (141)$$

представляет собой спектральную плотность мощности процесса $U(t)$, среднюю за время T . Теперь осталось только избавиться от зависимости оценки энергетического спектра $G(\omega)$ от T

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|S_T(\omega)|^2}{T}. \quad (142)$$

Для стационарного случайного процесса энергетический спектр $G(\omega)$ является неслучайной (детерминированной) величиной. Возможен переход (Бендат, Пирсол, 1971) к определению $G(\omega)$ в виде

$$G(\omega) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta f T} \int_0^T U^2(t, \Delta\omega, \omega) dt. \quad (143)$$

Спектральная плотность мощности $G(\omega)$ описывает общую частотную структуру процесса через спектральную плотность среднего значения его квадрата. Совершенно ясно, что аналоговое определение $G(\omega)$ должно включать операцию возведения в квадрат, и после узкополосного фильтра в анализаторе должен следовать квадратичный детектор, т. е. система анализа должна иметь вид: «узкополосный фильтр — квадратичный детектор». Существуют методы определения $G(\omega)$ по Фурье — преобразованию реализации стационарного случайного процесса (Мирский, 1972), но и в этом случае наличие квадратирующих схем является необходимым условием.

Выше мы рассмотрели некоторые из прямых методов определения энергетического спектра стационарного случайного процесса. Косвенный метод определения энергетического спектра, основанный на его связи с корреляционной функцией в соответствии с теоремой Винера — Хинчина, также предполагает операцию квадрирования или перемножения ввиду того, что эта операция заложена в алгоритме вычисления корреляционной функции. В этом случае выражение для энергетического спектра имеет вид:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (144)$$

Эта формула ярко иллюстрирует отличие $G(\omega)$ от $S(\omega)$. Действительно, $S(\omega)$ выражается через мгновенные значения процесса $U(t)$, а $G(\omega)$ — через мгновенные значения его корреляционной функции $R(\tau)$.

Для определения спектров нестационарных случайных процессов существует ряд методов, но их описание выходит за рамки

настоящего изложения, и мы отсылаем читателя к руководствам (Бендат, Пирсол, 1974; Котюк и др.; 1967; Мирский, 1972; Харкевич, 1962). Отметим только, что при определении спектральных характеристик нестационарных случайных процессов операция квадрирования также является необходимой.

Таким образом, если экспериментатору приходится иметь дело с детерминированными процессами, он может воспользоваться спектр анализатором с линейным детектором. Однако в этом случае он будет лишен возможности получить детерминированные характеристики случайных величин. Измерять спектральные характеристики детерминированных величин можно и приборами с квадратичным детектором. При этом будет измеряться энергетический спектр детерминированного процесса. В этом случае придется делать пересчет к амплитудному спектру или спектральной плотности.

Отметим, что переходы от амплитудных к энергетическим спектрам и наоборот следует совершать весьма осторожно. Например, энергетический спектр гармонического колебания $U(t) = A \cos \omega_0 t$ выражается формулой:

$$G(\omega) = \frac{A^2}{2} \delta(\omega - \omega_0). \quad (145)$$

В силу неидеальности способа получения $G(\omega)$ в спектр анализаторе на его выходе будет получен пик конечной ширины, что также следует учитывать при пересчете. Измерять с помощью приборов, содержащих линейный детектор, спектральные характеристики случайных процессов нельзя, так как на выходе прибора будет получена случайная функция.

4. Визуальное наблюдение, фото- и кинопередача биоакустической информации

Наиболее удобным в настоящее время прибором для визуального наблюдения электрических процессов (и биоакустических, которые, как правило, преобразуются в электрические) является электронный осциллограф. Он может быть использован также для измерения частоты, фазы, напряжения, коротких промежутков времени и пр. Электронные осциллографы отличаются большим входным сопротивлением, безынерционностью до очень высоких частот, хорошей чувствительностью и широкополосностью. В настоящее время существует большое число электронных осциллографов различного типа и назначения (Терешин, 1968).

Переносные однолучевые осциллографы, например С1-5, С1-20, С1-22, С1-34 и другие, служат в основном для визуального наблюдения и измерения параметров импульсных и периодических процессов в лабораторных и полевых условиях.

В некоторых осциллографах за счет сменных блоков достигается определенный универсализм, т. е. расширение области их применения. К таким относятся С1-49А, С1-45, С1-47.

Таблица 7

Тип прибора	Полоса пропускания, Мгц	Чувствительность, мв,см	Входное сопротивление и емкость	Тип ЭЛТ
-------------	-------------------------	-------------------------	---------------------------------	---------

1. Низкочастотные малогабаритные

Однолучевые

C1-5	$10 \cdot 10^6 - 10$	40—120	0,5Мом, 50пф	8Л029И
C1-19, C1-19Б	0—1	2	1Мом, 40пф	13Л036В
C1-20	$10 \cdot 10^6 - 26$ $2 \cdot 10^6 - 2$	100	0,5Мом, 40пф	13Л03И
C1-22	0—5	170	1Мом, 50пф	8Л03И
C1-30 и C1-19 (совместно с C1-21)	0—200 (эф- фективная полоса)	50	75ом, 12пф	—
C1-35	0—5	20	1Мом, 50 пф	8Л04И
C1-43	0—10	50	50пф	13Л011И

Двухлучевые

C1-16	0—5	20	0,5Мом, 45пф	16Л02И
C1-18	0—1	20—1	0,5Мом, 50пф	16Л02И
C1-34	0—5	170	1Мом, 50пф	9Л01И

Пятилучевой

C1-33	20 гц — 5 мгц	10	0,5Мом, 40пф	22Л01А
-------	---------------	----	--------------	--------

2. Многофункциональные со сменными блоками

Однолучевые

C1-13А (с блоками РБ-1)	$20 \cdot 10^6 - 15,20$	100—40	1Мом, 30пф	13Л03И
C1-15	0—25	0,05—100	0,5—1Мом, 40пф	13Л03И
C1-15/3 (с коммутатором)	0—20	100	0,5Мом, 40пф	13Л03И
C1-15/7 (стробоскопический)	0—200	20	75ом, 0,5Мом	—

Двухлучевые

C1-17	0—10	0,05—100	0,5—1Мом, 40пф	16Л02И
C1-15/8 (стробоскопический)	1 кгц — 350 мгц	20—50	75ом	—

3. С высокой точностью измерения и цифровым отчетом

C1-40 (со сменными блоками)	0—30	50—100	0,5Мом, 25—30пф	13Л010Т
-----------------------------	------	--------	--------------------	---------

4. Стробоскопические

Одноканальные

C1-21 (приставка к C1-19 и C1-30)	0—200	50	75ом, 12пф	—
-----------------------------------	-------	----	------------	---

Таблица 7 (окончание)

Тип прибора	Полоса пропускания, Мгц	Чувствительность, мв/см	Входное сопротивление и емкость	Тип ЭЛТ
C1-15/7 (блок к C1-15 и C1-17)	0—200	20—100	75ом, 0,5Мом, 15пф	—
X2-3	0—500	20—100	2 ком, 5пф	—
Двухканальные				
C1-15/8 (блок к C1-15 и C1-17)	0,001—350	20—50	75 ом	13Л09И
C1-39	0—700	10	100ком, 2,5пф	
5. Широкополосные				
Однолучевые				
C1-31	0—80	100	0,1Мом, 17пф	13Л010Т
C1-11	0,01—200	50	75 ом	13Л0104А
C1-36	0—1000	1000	75 ом	Футер-2
Двухлучевые				
C1-7	30 гц — 60 мгц	170	0,475Мом, 17пф	18Л047А
6. С электронной памятью *				
Однолучевые				
C1-44	0—0,003	3000	0,5Мом, 35пф	16ЛМ1
C1-37	0—1	10	0,5Мом, 40пф	13ЛН2
C1-29	0—2	100	0,5Мом, 45пф 75 ом	13ЛН5
Двухлучевые				
C1-42	0—7	38	0,5Мом, 55пф	3ЛН6

* Для этих осциллографов время памяти при воспроизведении изображения составляет 1 час (для C1-37 — 30 час.), а без воспроизведения: для C1-44 — несколько суток, для C1-37 — 170 час., для C1-29 — 16 час. и для C1-42 — 24 час.

Большое удобство в работе представляет пятилучевой осциллограф C1-33, позволяющий наблюдать пять электрических процессов одновременно. Кроме того, этот прибор дает возможность фотографировать однократные процессы специальной фотокамерой РФК-5 и кинокамерой.

Значительный интерес представляют собой запоминающие осциллографы (C1-29, C1-37), обеспечивающие запоминание, воспроизведение и исследование однократных, непрерывных и импульсных процессов. Например, осциллограф C1-37 в обесточенном состоянии способен хранить информацию в течение 170 час.

Таблица 8

Тип прибора	Диапазон частот, гц	Применяемый фотоматериал	Число каналов	Тип вибратора
Н10	10 000	Фотопленка 35 мм	4	МОВ2
Н102	6000	Фотопленка 35 мм	8	Н135
Н105	5000	Фотопленка 35 мм, 60 мм, 100 мм, 120 мм, дневная и осциллографическая бумага	12	М1010
К105	5000	Фотопленка 35 мм, 60 мм, 10 мм, 120 мм, дневная и осциллографическая бумага	12	М1010

Интересны также стробоскопические осциллографы и стробоскопические приставки (С1-21) к обычным осциллографам, позволяющие исследовать быстропротекающие процессы.

В настоящее время широко пользуются кино- и фоторегистрацией быстропеременных процессов с экрана осциллографа. Выше уже упоминался осциллограф с приставкой для фото- и кинопередачи. Однако иногда бывает необходимо осуществлять не покадровую, а непрерывную регистрацию процессов на киноленту. С этой целью иногда оказывается возможным и полезным удаление грейферных устройств и компенсационных призм в кинокамерах и осуществление съемки на непрерывно движущуюся киноленту. Такие переделки, в частности, допускают кинокамеры РФК-5, СКС-М. В последней камере применяется 16-миллиметровая кинолента. При удалении компенсационной призмы эта камера позволяет осуществлять регистрацию быстропеременных процессов на киноленту, непрерывно движущуюся со скоростью до 40 м/сек.

Помимо электронных осциллографов для целей визуального наблюдения и фоторегистрации электрических процессов применяются светолучевые осциллографы (шлейфовые) (Шкурин, 1964). К таким осциллографам относятся четырехканальные типа Н10, восьмиканальные типа Н102, двенадцатиканальные типа Н105 и К105. Во всех этих осциллографах фоторегистрацию информации осуществляют на непрерывно движущуюся фотоленту или осциллографическую бумагу.

В табл. 7 приведены выпускаемые отечественной промышленностью электронные осциллографы, в табл. 8 — некоторые типы светолучевых осциллографов.

5. Оценка ошибок измерения

При проведении биоакустических измерений необходимо помнить, что в задаче измерений входит не только нахождение самой величины, но также и оценка допущенной при измерении погрешности.

Существуют три типа погрешностей измерения.

1. Систематические, величина которых одинакова во всех измерениях, проводящихся одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов. Иногда систематические ошибки могут быть учтены в виде поправок.

2. Случайные, величина которых различна даже для измерений, выполненных одинаковым образом.

3. Промахи. Источником промахов является недостаток внимания экспериментатора. Для устранения промахов нужно соблюдать аккуратность и тщательность в работе и записях результатов.

Примером систематической погрешности может служить погрешность измерительных приборов, которая определяется иногда классом точности прибора. Если на приборе указан класс точности 0,5, то это значит, что показания прибора правильны с точностью до 0,5% от всей действующей шкалы прибора. Совершенно очевидно, что нет смысла пытаться проводить измерения таким прибором с точностью, скажем, в 0,1%.

Случайные ошибки обязаны своим происхождением ряду причин, действие которых неодинаково в каждом опыте и не может быть учтено.

Ошибки различают абсолютные и относительные. Абсолютная ошибка представляет разность истинного и измеренного значения величины. Если истинное значение величины обозначить через x , а измеренное — через x_n , то абсолютная ошибка будет равна

$$\Delta x = x - x_n. \quad (146)$$

Поскольку истинное значение измеряемой величины, вообще говоря, неизвестно, вместо него берут среднеарифметическое значение измеряемой величины, определяемое как

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}, \quad (147)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — значения измеряемой величины, полученные при каждом отдельном измерении; n — число измерений. При большом числе измерений среднеарифметическое значение измеряемой величины стремится к ее истинному значению.

Относительная ошибка исчисляется в процентах и определяется как

$$\Delta x \text{ отн.} = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (148)$$

Точность измерений обычно характеризуется средней арифметической или средней квадратичной ошибками. Средняя арифме-

тическая ошибка r_n вычисляется по формуле

$$r_n = \frac{|\bar{x} - x_1| + |\bar{x} - x_2| + \dots + |\bar{x} - x_n|}{n} = \frac{\sum_1^n |\bar{x} - x_n|}{n}. \quad (149)$$

Обозначение $|\bar{x} - x_i|$ выражает, что при подсчете все разности считаются положительными без учета их действительного знака; иначе говоря, суммируются абсолютные значения величин $(\bar{x} - x_i)$. Если число измерений n не очень велико, то лучше вместо формулы (149) пользоваться формулой

$$r_n = \frac{\sum_1^n |\bar{x} - x_n|}{\sqrt{n(n-1)}}, \quad (150)$$

при большом n различие, даваемое формулами (149) и (150), очень невелико. Средняя квадратичная ошибка отдельного измерения определяется по формуле

$$s_n = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{x} - x_i)^2}{\frac{1}{n-1}}}; \quad (151)$$

квадрат этой величины называется дисперсией измерений.

Относительная величина средней квадратичной ошибки W , выраженная в процентах, носит название коэффициента вариации

$$W = \frac{s_n}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (152)$$

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического равна средней квадратичной ошибке отдельного измерения, деленной на корень квадратный из числа измерений

$$s_x = \frac{s_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (153)$$

Если измеряемая величина является суммой (или разностью) двух или нескольких величин, то средняя квадратичная ошибка суммы (или разности) двух (или нескольких) независимых величин равна корню квадратному из суммы дисперсий отдельных слагаемых. Пусть измеряемые величины есть X и Y . Тогда дисперсии их будут равны соответственно s_x^2 , s_y^2 . Если $Z = X \pm Y$, то

$$s_z = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}. \quad (154)$$

Введем понятие прямых и косвенных измерений. Прямыми измерениями называются такие измерения, при которых нужная величина измеряется непосредственно.

При косвенных измерениях нужная величина вычисляется по измеренным вспомогательным величинам. Например, необходимо знать площадь прямоугольника со сторонами a и b . Измеряем a и b и вычисляем площадь A по формуле

$$A = a \cdot b. \quad (155)$$

Считается, что значение площади получено в результате косвенных измерений. Ошибка косвенных измерений вычисляется следующим образом. Если s_a^2 и s_b^2 — дисперсии соответственно измеряемых величин a и b , то

$$s_A^2 = (a \cdot s_b)^2 + (b \cdot s_a)^2. \quad (156)$$

Если $B = a \cdot b \cdot c$, то

$$s_B^2 = (a \cdot b \cdot s_c)^2 + (a \cdot c \cdot s_b)^2 + (b \cdot c \cdot s_a)^2. \quad (157)$$

Если нас интересует частное от деления двух измеряемых величин, например $Z = Y/X$, то дисперсия частного определяется по формуле

$$s_Z^2 = \frac{s_Y^2}{X^2} + \left(\frac{Y}{X^2}\right)^2 s_X^2. \quad (158)$$

Относительная ошибка для случаев (155) и (158) выглядит одинаково:

$$\frac{s_A^2}{A^2} = \frac{s_a^2}{a^2} + \frac{s_b^2}{b^2} \quad (159)$$

и аналогично

$$\frac{s_Z^2}{Z^2} = \frac{s_X^2}{X^2} + \frac{s_Y^2}{Y^2}. \quad (160)$$

Вообще можно рекомендовать следующий формальный метод определения погрешностей. Пусть

$$Y = f(X). \quad (161)$$

Если ошибки малы по сравнению с измеряемой величиной, мы можем с достаточной точностью написать

$$\Delta Y = f'(X) \cdot \Delta X. \quad (162)$$

Относительная ошибка запишется в виде:

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \frac{f'(X)}{f(X)} \cdot \Delta X, \quad (163)$$

здесь $f'(X)$ — первая производная по X . Соотношения (162) и (163) могут оказаться неверными в том случае, если нас интересует значение ΔY или $\Delta Y/Y$ вблизи экстремума функции Y , где $f'(X)$ обращается в нуль.

После того как произведено n измерений нужной величины \bar{x} , вычислено среднеарифметическое значение ее \bar{x} и средняя квадратичная погрешность s_n , можно записать

$$x = \bar{x} \pm s_n \quad (164)$$

или

$$\bar{x} - s_n < x < \bar{x} + s_n. \quad (165)$$

Это означает, что истинное значение измеряемой величины заключено в интервале значений, определяемых неравенством (165). Этот интервал значений ($\pm s_n$) носит название доверительного интервала. Но из (165) совсем не значит, что истинное значение \bar{x} измеряемой величины наверняка (с вероятностью 100%) заключено в указанном доверительном интервале. Существует определенная вероятность того, что истинное значение измеряемой величины заключено в данном доверительном интервале. Эта вероятность называется доверительной. Полезно запомнить следующее. Средней квадратичной ошибке s_n соответствует доверительная вероятность 0,68; удвоенной средней квадратичной ошибке ($2s_n$) — доверительная вероятность 0,95; утроенной ($3s_n$) — 0,997. Это правило можно записать короче:

$$\begin{aligned} \bar{x} - s_n < x < \bar{x} + s_n & \text{ с вероятностью } 0,68, \\ \bar{x} - 2s_n < x < \bar{x} + 2s_n & \text{ с вероятностью } 0,95, \\ \bar{x} - 3s_n < x < \bar{x} + 3s_n & \text{ с вероятностью } 0,995. \end{aligned}$$

Все сказанное выше справедливо при одном непрременном условии: ошибки подчиняются нормальному закону распределения (закону Гаусса), описываемому следующей функцией:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}}, \quad (166)$$

здесь

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n. \quad (167)$$

Глава V

ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА В БИОАКУСТИКЕ

Телеметрическая техника получила широкое применение прежде всего в промышленности и технических науках. Уже почти полвека телеметрическая техника применяется в нефтяной промышленности, метеорологии, космических исследованиях. В биологии телеметрия стала применяться значительно позднее, причем прежде всего с целью прослеживания. Получение же информации о физиологических параметрах животных стало возможным лишь в последнее десятилетие в связи с развитием микроэлектронной техники.

Телеметрия может быть осуществлена двумя принципиально различными способами: посредством проводной связи между исследуемым объектом и исследовательской аппаратурой и путем беспроводной связи. Первый способ является более простым, он доминирует при лабораторных исследованиях. Нередко, однако, применение проводной линии, соединяющей исследуемого с регистрирующей аппаратурой, приводит к довольно громоздким условиям наблюдений, особенно когда регистрируются те или иные процессы во время двигательной активности. Беспроводная связь в большинстве случаев осуществляется с помощью радиоволн, реже используется акустическая связь и еще реже оптическая. Наиболее совершенным является способ радиотелеметрии. Он обеспечивает весьма широкие возможности, в частности исследователь может получать данные наблюдений непосредственно по ходу эксперимента. Разумеется, с технической стороны этот путь достаточно сложен, особенно если учесть необходимость специальных мер по устранению помех и искажений информации, которые, в принципе, могут возникать в связи с введением радиоканала.

Здесь уместно привести слова американского ученого Холтера, сказанные им на симпозиуме по биотелеметрии, состоявшемся в Нью-Йорке в 1962 г.: «При решении проблемы сотрудничества между физиками и биологами мне хотелось бы настоятельно призвать вас к тому, чтобы электронная аппаратура наилучшим образом соответствовала цели своего назначения в биологических экспериментах и была бы возможно более простой. Среди инженеров существует тенденция увлекаться блестящими схемными решениями, забывая о назначении разрабатываемой аппаратуры».

И еще: «Я предлагаю, далее, пользоваться телеметрией не ради самой телеметрии, но только в тех случаях, когда она действительно является наилучшим методом» (Холтер, 1965). К этому пожеланию трудно что-либо добавить.

В области биоакустики телеметрия делает свои первые шаги. Существуют буквально единицы работ, в которых в той или иной мере применяется телеметрическая техника. Здесь пока еще не грозит опасность чрезмерного увлечения телеметрией. Скорее наоборот. Необходима самая широкая пропаганда этого метода исследования. Прежде чем перейти к описанию конкретных разработок в этой области, изложим основные понятия из общей теории связи и теории информации, которые полезно знать всем, кто имеет дело с измерительной техникой, передачей, регистрацией и хранением информации.

1. Общие понятия

Понятие «информация» в известном смысле можно определить как сведения, которые являются объектом сбора, передачи, хранения и обработки. Информация существует либо в статической форме, когда она сохраняется (в виде записей, изображений и т. д.), либо в динамической, когда она передается (в виде физических, биологических, химических и других процессов).

В 1927 г. предложена «количественная мера информации» или информационная емкость системы хранения или передачи информации, называемая «двоичной единицей», или «битом». Если ячейка, в которой хранится информация, имеет n возможных состояний, то две такие ячейки будут иметь n^2 , а m ячеек — n^m возможных состояний. Значит между количеством ячеек и числом возможных состояний существует экспоненциальная зависимость. С учетом этого введена логарифмическая мера информационной емкости

$$C = \log N, \quad (168)$$

где N — число различных состояний системы. Эта мера отвечает требованию аддитивности, т. е. количество информации, сохраняемой в m одинаковых ячеек, в m раз больше, чем в одной ячейке. Действительно, информационная емкость системы, состоящей из m ячеек и имеющей $N = n^m$ состояний, равна емкости одной ячейки, умноженной на число ячеек

$$C = \log n^m = m \log n. \quad (169)$$

Если взять логарифм с основанием 2, то информационная емкость C будет представлять собой число элементарных двоичных ячеек, каждая из которых имеет два возможных состояния. Емкость такой простейшей двоичной ячейки получила название «двоичная единица», или «бит». Заданная информационная емкость может быть заполнена различным количеством информации в зависимо-

ти от того, каким образом эта информация закодирована (представлена).

Информация может передаваться из одного пункта в другой при помощи системы связи, которая состоит из передатчика и приемника, соединенных друг с другом линией связи. Линия связи — это либо провода, либо пространство, в котором распространяются световые, звуковые или радиоволны.

Совокупность сведений, которые должны быть переданы получателю, получили название сообщения. Источником сообщения является отправитель (в биотелеметрической системе — это исследуемый живой организм вместе с наложенными на него датчиками). В передатчике сообщение преобразуется в соответствующий сигнал, который передается по линии связи к приемнику, где происходит обратное преобразование сигнала в сообщение.

Одной из основных характеристик системы связи является ее пропускная способность (или эффективность), т. е. количество информации, которое можно передать по данной системе в единицу времени при необходимой точности передачи.

В реальных условиях сообщение в процессе передачи по линии связи подвергается воздействию всякого рода помех. Поэтому система связи должна обладать способностью противостоять мешающему действию помех. Такая способность системы называется ее помехоустойчивостью.

По линии связи может быть одновременно передано несколько различных сообщений, причем каждое передается по своему каналу. Здесь под каналом подразумевается совокупность технических устройств, которые обеспечивают передачу данного сообщения по общей линии связи независимо от других одновременно передаваемых по этой же линии сообщений. Таким образом, можно повысить эффективность системы связи, сделав ее многоканальной. Однако при этом возникает проблема разделения сигналов отдельных каналов, поскольку все сигналы передаются по одной линии связи.

По линии связи эффективно распространяется не всякий электрический процесс. По проводной линии, например, легко проходит постоянный ток или переменный низкочастотный ток, по радиолинии — только электромагнитные колебания достаточно высоких частот. Поэтому для образования сигнала необходим так называемый переносчик, наиболее эффективно распространяющийся по данной линии связи. При радиопередаче таким переносчиком является несущая частота, электромагнитные колебания обычно синусоидальной формы, которые характеризуются определенными параметрами: амплитудой, частотой и фазой. Если параметры переносчика неизменны, то мы не можем передать никаких сведений. Поэтому необходимо изменить один из параметров переносчика в соответствии с сообщением, т. е. модулировать его. Такой переносчик, параметры которого модулируются, называется сигналом. Этот сигнал излучается антенной передатчика в

пространство и распространяется к антенне приемника. В радиосвязи используют амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) или (ФМ) фазовую модуляцию. В качестве переносчика может быть также использована последовательность импульсов постоянного тока. При этом соответственно изменениям параметров последовательности (амплитуды, частоты повторения, длительности импульсов) различают амплитудно-импульсную (АИМ), фазовую импульсную модуляцию (ФИМ), модуляцию по длительности импульсов (ДИМ). Существует также так называемая кодово-импульсная модуляция (КИМ), при которой различные дискретные значения функции сообщения передаются посредством различных комбинаций импульсов — кодовых групп.

Если в качестве переносчика используется последовательность радиочастотных импульсов, то, кроме модуляции по амплитуде, длительности и частоте следования этих импульсов, можно осуществить модуляцию и самой несущей частоты. Таких сложных видов модуляции существует большое количество. Условно они обозначаются двумя группами букв, первая из которых обозначает способ модуляции вспомогательного колебания (поднесущей), а вторая — способ модуляции несущей частоты колебаниями поднесущей. Например, частотная модуляция поднесущей при частотной модуляции несущей обозначается ЧМ — ЧМ, амплитудная модуляция поднесущей при частотной модуляции несущей — АМ — ЧМ и т. д. С точки зрения простоты системы, требуемой входной мощности и надежности, наилучшей является система с ЧМ — ЧМ. Следует отметить, что системы с ЧМ обладают существенным недостатком: сигналы ниже некоторого порогового значения сильно искажаются из-за паразитной АМ в связи с интерференционным характером поля передатчика.

Рассмотрим взаимосвязь между характеристиками сигнала и канала связи, по которому он должен быть передан. Для удобства сигнал характеризуют его объемом

$$V_c = T_c \cdot F_c \cdot H_c, \quad (170)$$

здесь T_c и F_c — соответственно длительность и частотный спектр сигнала,

$$H_c = \log_2 \frac{P_c}{P_n} \quad (171)$$

P_c и P_n — соответственно средняя мощность сигнала и помехи. Аналогично можно характеризовать и канал связи. Емкость канала связи:

$$V_k = T_k \cdot F_k \cdot H_k. \quad (172)$$

Очевидно, что условие передачи сигнала будет

$$V_k \gg V_c. \quad (173)$$

Отсюда можно сделать вывод, что для согласования сигнала с каналом связи можно изменять его отдельные характеристики так, чтобы объем сигнала не изменялся, например, увеличив время передачи, можно тем самым сократить требуемую полосу частот и т. д. Для этого применяются различные способы кодирования.

Кодирование — это процесс преобразования сообщения (информации) из одной формы в другую с целью решения определенной задачи. В технике связи кодирование применяется с целью создания технически рациональных и экономичных условий для передачи сообщения. Код — это некоторый закон или система правил преобразования сообщения из одной формы в другую. Разработано и исследовано множество различных методов кодирования.

Практически важной характеристикой канала связи является его предельная пропускная способность, или емкость C , т. е. количество информации, которое может быть передано по каналу связи с бесконечно малой вероятностью ошибки

$$C = F_k \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\Pi}} \right) \text{ дв. ед./сек.} \quad (174)$$

Из этой формулы видно, что с увеличением мощности сигнала и полосы частот канала увеличивается предельная пропускная способность или максимальная скорость передачи сообщения. Для канала с очень высоким уровнем помех ($P_{\Pi} \gg P_c$) его емкость и максимальная скорость передачи близки к нулю. Однако такой канал имеет пропускную способность, хотя и значительно уменьшенную. Применяя специальные методы накопления, корреляции и кодирования, можно использовать и этот канал. Но реализовать канал с неограниченной пропускной способностью практически невозможно из-за наличия разнообразных погрешностей в прямо-передающей аппаратуре.

Особенностью многоканальной системы связи является то обстоятельство, что на приемном конце линии связи имеется устройство для разделения сигналов, соответствующих различным каналам. Разделение каналов — это по существу выделение сигнала на фоне помех (помехой в этом случае является сигнал соседнего канала). Наиболее распространенными являются методы частотного и временного разделения каналов. Любой сигнал имеет ограниченный частотный спектр. Каждый приемник должен содержать частотный фильтр, пропускающий только спектр частот своего сигнала. Такое разделение и называют частотным. В системе с временным разделением каналов линия связи поочередно представляется для передачи разных сигналов. Осуществляется это в передатчике с помощью специального коммутатора (переключателя). Аналогичный коммутатор на приемном конце, работающий синхронно (с той же скоростью) и синфазно с первым, разделяет сигналы различных каналов.

При многоканальной передаче всегда есть опасность взаимного влияния каналов друг на друга. Это то, что называют взаимными помехами. В случае частотного разделения частот соседних каналов, проходя через частотный фильтр данного канала, оказывают мешающее действие при приеме полезной информации. Для ослабления этих помех между каналами предусматривают так называемые «защитные» частотные полосы. В случае временного разделения каналов причиной взаимных помех является своего рода «инерционность» линии связи. Дело в том, что любая линия связи содержит элементы, способные накапливать электрическую энергию, — это индуктивности и емкости. Наличие этих элементов приводит к искажению формы передаваемого сигнала, поскольку энергия, накопленная в линии от данного сигнала, суммируется с энергией сигналов соседних каналов.

Перейдем к рассмотрению конкретных телеметрических разработок, нашедших применение в биоакустических исследованиях.

2. Телеметрия в биоакустике

Телеметрический метод исследования пока еще не нашел широкого применения в биоакустике. Это объясняется, по-видимому, главным образом тем, что биоакустическая информация является значительно более широкополосной, чем все другие виды биологической информации. Для передачи биоакустической информации требуется канал связи с большой пропускной способностью в соответствии с формулой (174) предыдущего параграфа (большое значение F_k). Дело в том, что полоса частот, требуемая для передачи биоакустической информации, простирается до сотен кГц, тогда как подавляющее большинство важнейших физиоло-

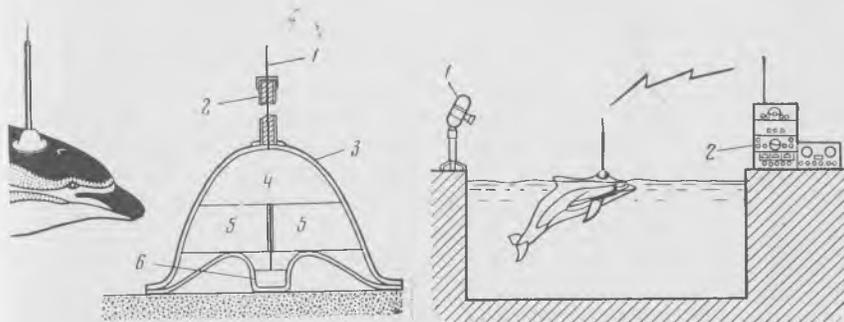


Рис. 75. Схема прибора и способ его крепления на дельфине

1 — антенна; 2 — коаксиальное покрытие; 3 — латексовый колпачок; 4 — усилитель-передатчик; 5 — источник питания; 6 — микрофон

Рис. 76. Схема эксперимента

1 — телевизионная камера; 2 — комплекс приборов для приема, анализа и регистрации данных

гических параметров животных и человека укладывается в полосу частот до 500 гц. Тем не менее уже имеется ряд работ, в которых предприняты попытки освоить весьма перспективный телеметрический метод.

По-видимому, раньше всего телеметрию стали применять при шумопеленгации рыбы (Maniva, 1960). Манива сообщает, что в Японии, используя систему автономных акустических буев, осуществляют контроль за миграцией некоторых рыб. Каждый буй снабжен приемно-передающим устройством. Принятые гидрофоном звуки рыб усиливаются, модулируют радиочастоту в несколько десятков мегагерц и передаются в эфир. Прием радиосигналов осуществляют стационарной приемной аппаратурой. Это, скорее, промышленное использование телеметрии, чем исследовательское.

Есть попытки применения телеметрии и в некоторых научных исследованиях по биоакустике. Ивенс и Сэзерленд (1965) использовали радиотелеметрию для регистрации звуков афалин непосредственно на голове дельфина. На рис. 75 показана схема прибора, которым они пользовались, и способ его крепления на дельфине, на рис. 76 — схема эксперимента. Радиопередача информации с дельфина осуществлялась по воздуху. Несущая частота передатчика — 27 мц. Возможности прибора весьма ограничены, так как звукоприемником служил контактный микрофон низкого качества (узкий диапазон рабочих частот). Тем не менее это первая серьезная попытка применить телеметрию при изучении биоакустики и поведения дельфинов. Ивенс и Сэзерленд изучали информативное значение производимых дельфинами звуков в группе. Телеметрия помогла им определить очередность звучания дельфинов при обмене сигналами. У Болдвина (Baldwin, 1965) кратко описан ЧМ передатчик размером около 13 см, который закреплялся с помощью присоски на голове дельфина и мог передавать биоакустическую информацию по радио из-под воды. Гидрофоном служила пьезокерамическая сфера, находившаяся в механическом контакте с тем участком тела дельфина, на котором измерялся характер звуковых сигналов. Глубина, с которой еще была возможна радиосвязь, составляла в морской воде всего около 30 см, в пресной воде — около 2,5 м. Никаких других сведений об аппаратуре и результатах исследования не приводится.

Дельфины являются одним из наиболее интересных объектов исследования в биоакустическом плане. Их хорошо развитая система эхолокации и коммуникации привлекает к себе внимание ученых. Поэтому понятны попытки, неоднократно предпринимаемые к тому, чтобы изучить их биоакустические механизмы. Недавно появилась работа (Diercks a. oth., 1971), в которой осуществлена многоканальная регистрация эхолокационных сигналов дельфина непосредственно на голове с помощью серии гидрофонов, закрепляемых с помощью присосок. Отведение полезной информации от гидрофонов осуществлялось по проводной связи. Этот

простейший вид телеметрии серьезно затруднял эксперимент, но тем не менее оказалось возможным получить некоторое представление о форме эхолокационных импульсов непосредственно у источников. Результаты, представленные в работе, немногочисленны и не позволяют сделать сколько-нибудь существенных выводов о механизме локации. Тем не менее метод регистрации звуков непосредственно у источника представляется весьма перспективным.

Остановимся более подробно на описании двухканальной телеметрической системы (Романенко и др., 1974), которая позволила проводить измерение звуков дельфинов непосредственно на голове с помощью двух миниатюрных цилиндрических гидрофонов, закрепляемых на присосках. Передача полезной информации с гидрофонов осуществлялась по радио под водой, для чего служили два радиопередатчика с несущими частотами 1,55 и 1,87 мгц с амплитудной модуляцией несущих полезным сигналом. Полоса пропускания канала связи составляла $3,5 \div 65$ кгц. Мощность передатчиков — 30 мвт. Разделение каналов — частотное. На рис. 77 показана схема эксперимента с применением описываемой телеметрической системы. Радиопередатчики (1) в процессе эксперимента были закреплены на спинном плавнике дельфина (2). Миниатюрные гидрофоны (3) — на голове. Гидрофоны присоединены к передатчикам экранированными проводами (4). Две излучающие антенны (5) (в каждом канале своя антенна) в виде отрезков гибкого провода длиной 1,5 м при движении дельфина вытягивались вдоль его тела. Свободные концы проводов-антенн оголены и находятся в электрическом контакте с водой. В контакте с водой находится также металлический корпус передатчиков, являющийся вторым полюсом излучающей антенны. Приемной антенной служат две металлические пластины (6 и 7), из которых одна (7) заземлена, а другая (6) присоединена ко входам двух радиоприемников (8 и 9) типа «Волна» с расширенными полосами пропускания по промежуточной частоте. Каждый из приемников настроен на свою несущую частоту. Выходы приемников подключены к ультразвуковым магнитофонам (10 и 11). Телеметрическая система вполне надежно работала при свободном плавании дельфина в сетевом вольере с размерами 100 м × 3 м × 3 м.

Принципиальная схема одного из передатчиков приведена на рис. 78. Схема другого передатчика такая же. Общий вес передающей части вместе с гидрофонами в воздухе составляет 320 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В БИОАКУСТИКЕ

Моделирование следует рассматривать как один из действенных методов исследования (Клюкин, Колесников, 1968). В акустике оно применяется, как правило, с целью упрощения и удешевления процесса измерений. Действительно, часто бывает дешевле и проще исследовать основные вопросы архитектурной или корабельной акустики на модели здания или корабля, чем в натуральных условиях. Некоторые особенности распространения звуковых волн в океане легче изучить на модели, чем в природных условиях.

Однако натура и модель должны подчиняться одним и тем же физическим законам. Два явления считаются подобными, если по заданным характеристикам одного из них можно получить характеристики другого масштабным пересчетом.

Моделирование может быть геометрическим, физическим и математическим.

Геометрическое моделирование дает внешнее представление о натуре и служит главным образом для демонстрации, показывая принцип действия, взаимное расположение частей и общий характер протекания процесса или характер звукового поля.

У физического и математического моделирования более серьезные задачи. Они должны дать численные значения величин, характеризующих поведение объекта в натуре.

Несколько слов о масштабах моделирования. В случае физического моделирования с сохранением геометрического подобия масштаб моделирования линейных размеров должен быть равен масштабу времени и обратно пропорционален масштабу частоты. При этом скорость звука не моделируется, так как она определяется параметрами материала, одинакового для природы и модели.

Моделирование в биоакустике имеет свои особенности. Прежде всего необходимость моделирования в биоакустике диктуется, как правило, не столько соображениями габаритов и стоимости, сколько трудностями работы с живым объектом. Поэтому, если в акустике масштабы моделирования обычно составляют $\frac{1}{5}$ ÷ $\frac{1}{50}$, в биоакустике в большинстве случаев, по-видимому, целесообразно брать масштаб $\frac{1}{1}$ или больше. Дальше мы увидим, что, например, электронная модель слухового анализатора существенно больше природы.

Сказанное выше о том, что скорость звука, как правило, не моделируется, не всегда справедливо в биоакустике, где мы имеем дело с живыми тканями. Если в модели используются материалы, отличные от живых тканей, необходимо учитывать различие скорости звука в тканях и материале модели.

1. Математическое моделирование

Математическое моделирование является широко распространенным методом исследования. Оно не связано с необходимостью изготовления какого-либо прибора или постановки экспериментов. В известном смысле это более доступный метод моделирования, чем физический (или технический). При математическом моделировании производят, по существу, численное решение уравнений, описывающих натуру. В акустике математическое моделирование применяется, по-видимому, чаще, чем физическое. В биоакустике — наоборот. Это связано с тем, что вопросами биоакустики интересуются специалисты различных профилей (биологи, инженеры, физики) и не все они имеют достаточную математическую подготовку. Тем не менее за последние годы появился ряд работ по математическому моделированию некоторых биоакустических явлений. В частности, делаются выводы о возможностях локационных систем дельфинов и летучих мышей в результате математического анализа систем, созданных человеком. Такой подход является характерным для ряда авторов (Batteau, 1967; Griffiths, 1967). Примечательно, что Гриффитс, проанализировав теории сопарных систем применительно к биологическим объектам, делает следующий вывод: «Маловероятно, чтобы животные, использующие звуковую локацию для ориентации, применяли бы какой-либо механизм формирования изображения, подобный сетчатке». Уместно напомнить, что А. Е. Резников (1970), на основании экспериментальных данных, отстаивает как раз обратную точку зрения. Он считает, что у дельфинов имеет место «звукосвидение». Здесь мы имеем дело с противоречием, в которое вступают результаты математического моделирования и физического эксперимента. Где здесь верное решение, покажут дальнейшие исследования. Интересно, что в дискуссии по работе Гриффитса (1967) биолог Дж. Д. Пай заметил: «Применение понятий, заимствованных из созданных человеком систем, неизбежно при создании первоначальных рабочих гипотез, но эти понятия следует применять с осторожностью к живым организмам, среди которых существует большое разнообразие».

Применяя метод математического моделирования, Д. Вестон (Вестон, 1970) рассмотрел особенности распространения звука в присутствии пузырных рыб; в работе Агаркова и других (1971) рассчитан как один из возможных вариантов механизм формирования диаграмм направленности излучения дельфинов;

Т. В. Алексеева, А. Г. Голубков и И. В. Ершова (1971) смоделировали математически локационные сигналы дельфинов.

Некоторые примеры математического моделирования будут рассмотрены в главе VII. Список работ, в которых применен метод математического моделирования биоакустических явлений, можно было бы продолжить. Но в этом нет необходимости. Не является также нашей задачей и критический анализ этих работ. Они служат лишь иллюстрацией применения метода математического моделирования.

Возможности метода математического моделирования значительно расширяются с развитием вычислительной техники. Вычислительная машина с ее огромной памятью и быстродействием способна осуществить математические расчеты, которые не под силу одному человеку и даже целым коллективам. Правда, вычислительная техника пока еще медленно внедряется в практику биоакустических исследований. Тем не менее уже появляются работы, имеющие отношение к биоакустике, в которых математическое моделирование проводится на базе машинной техники. Примером может служить работа Алтса (Altes, 1971), в которой дан метод математического моделирования широкополосных радиолокационных и гидролокационных сигналов, с помощью которых можно точно измерить скорость движения мишени. Автор предполагает, что подобные сигналы излучаются дельфинами.

В главе VII будут описаны результаты машинного моделирования эхолокационных сигналов дельфинов.

2. Физическое моделирование

Физическое (механическое, электрическое) моделирование используется, когда необходимо экспериментально изучить механизм какого-либо явления или когда конструируется какое-либо устройство, основанное на изученном явлении.

Историческим примером моделирования в биоакустике может служить изготовление и применение устройств для имитации звуков рыб с целью их привлечения и лова. Хорошо известны приемы лова сомов на «клочку», которая грубо имитирует звуки захвата сомом пищи. На побережье Явы бытует народный способ лова рыбы на человеческий голос: рыбак, стоящий в воде, издает звук «о-ох». На побережье Средиземного моря рыбу привлекают ритмичными ударами палкой по воде, в этом случае имитируется зов самцом самки. На побережье Индонезии используется звук трещотки над водой для привлечения акул, имитируется звук питания акул. Известен лов на «морышку», которая представляет собой пустотелую металлическую бусинку у крючка удочки. Подергивание ее имитирует звук захвата окунем мелких рыб. Жужжащие приманки, имитирующие жужжание мухи. Рыбаки Тихого океана применяют устройства, разбрызгивающие воду на поверхности моря. Имитируются гидродинамические звуки сардин. Спи-

сок подобных устройств и приемов можно было бы продолжить (Протасов, 1965). Но в этом нет необходимости. Примечательно, что критерии подобия в приведенных выше примерах моделей выполнены чисто интуитивно, о чем свидетельствует эффективность их в процессе лова.

В биоакустике успешно применяется метод электрического моделирования, основанный на использовании электродинамических аналогий (Тетельбаум, 1959). Обычно используются две системы аналогий: прямая и обратная. Прямая система имеет дело с сопротивлениями, обратная — с проводимостями. Последовательному соединению в одной системе соответствует параллельное соединение в другой, активное сопротивление переходит в проводимость, емкостное — в индуктивное и наоборот. В табл. 9 приведено соответствие акустических и электрических величин по прямой и обратной системе аналогий.

Таблица 9

Электрические величины	Акустические величины	
	прямая аналогия	обратная аналогия
U — напряжение i — ток	P — давление v — скорость	v — скорость P — давление
R — сопротивление	r — активное сопротивление потерь	$\frac{1}{r}$ — акустическая проводимость
C — емкость	C — податливость	m — инерционная масса
L — индуктивность	m — инерционная масса	C — податливость
Z — полное сопротивление	Z_a — полное акустическое сопротивление	Y_a — полная акустическая проводимость

Хорошим примером электрического моделирования в биоакустике может служить нейронная модель импульсной слуховой реакции (De Rosa, Vallesse, 1966). В этой модели нейронные волокна моделируются релаксационными генераторами с определенными характеристиками. Детекторы и фильтры нижних частот моделируют действие волосковых клеток в улитке, а функции, получаемые на выходах нейронного анализатора, моделируют импульсные потоки. Исследуются процессы кодирования импульсных, а также стационарных сигналов и определяются характеристики отношения полезного сигнала к шуму в канале, передающем информацию.

Разработана также модель, дающая зрительное представление нейронной активности в слуховом анализаторе при восприятии речи (Stewart, Kasson, 1966). Одна часть этой модели имитирует вибраторную активность внутреннего уха, другая — нервные процессы за пределами механических структур уха. Такая модель

позволяет глубже понять механизмы работы слухового анализатора. В частности, модель позволяет понять механизм, с помощью которого слушатель может выделять речь одного из говорящих в гуле голосов.

В биоакустике птиц примером механического и электрического моделирования может служить моделирование слуховой системы ушастой совы (Черный, 1972), которое позволило правильное понять механизм шумопеленгации у сов.

Есть определенная категория модельных физических экспериментов, которая совершенно необходима при исследовании биоакустики дельфинов. Речь идет об аттестации мишеней, с помощью которых изучается механизм распознавания дельфинами мишеней по размеру и материалу. Такие эксперименты помогают выявить те информативные признаки, которыми руководствуется дельфин при распознавании мишеней, и являются не столько биоакустическими, сколько акустическими. В них должны выполняться упоминавшиеся выше масштабы моделирования.

Исследование биоакустики дельфинов наиболее интенсивно проводится лишь в последние несколько лет. Может быть, именно поэтому пока еще нет физических и технических моделей, построенных на основе биоакустических механизмов дельфинов. В частности, проблема гидролокации у дельфинов относится к числу наиболее трудных. Трудности исследования обусловлены прежде всего средой обитания дельфинов, отсутствием готовых приборов и инструментов исследования. Неудивительно поэтому, что проблема изобилует гипотезами, нередко противоречивыми. Одна из таких гипотез касается механизма излучения звука дельфинами. Ее предложил Лилли (Lilly a. oth., 1961a), который считал, что эхолокационные щелчки вызываются «ударным возбуждением резонансных частот и гармоник в наполненных воздухом полостях головы (изменяющиеся мешочки, неизменные полости, неизменные носовые проходы и т. д.)». Эта гипотеза находит поддержку и у некоторых других исследователей. До последнего времени эта гипотеза и не вызвала особых сомнений, так как неоднократно регистрировавшиеся звуки дельфинов в дальнем акустическом поле, как правило, имели колебательный характер и даже эхолокационные импульсы обычно содержали несколько колебательных периодов. На рис. 79 показано несколько таких эхолокационных импульсов, заимствованных из работы Г. Л. Заславского (1971).

В последние годы появились работы Диркса и соавторов (Diercks a. oth., 1971) и Е. В. Романенко (1972б), которые свидетельствуют о том, что излучение эхолокационных импульсов афалиной имеет, по-видимому, нерезонансный характер. На рис. 84 следующей главы показаны фотографии нескольких эхолокационных импульсов. Выводы о нерезонансном излучении дельфинами эхолокационных импульсов заставили по-новому отнестись к гипотезе, предложенной Лилли, и убедили в необходимости ее стро-

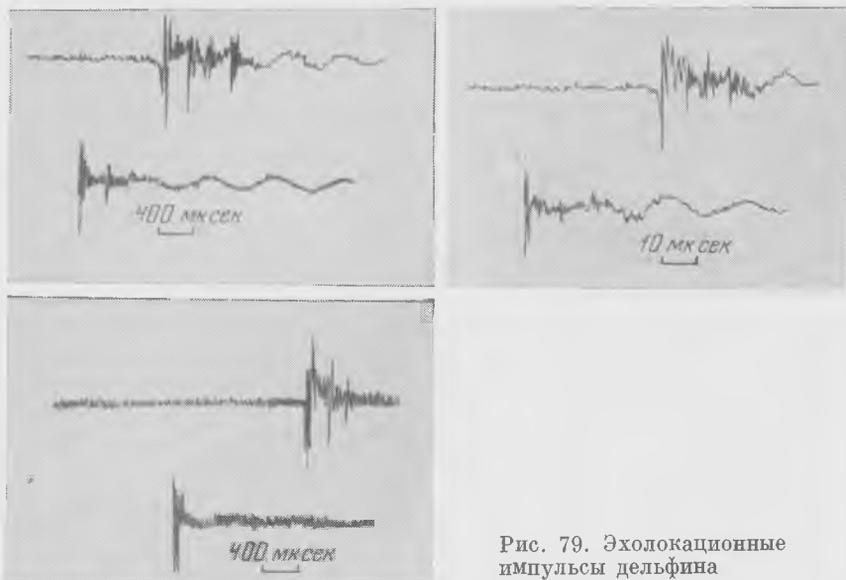


Рис. 79. Эхолокационные импульсы дельфина

гой проверки методом физического моделирования. Такое моделирование было осуществлено (Романенко, 1972б). Был поставлен модельный эксперимент по выяснению характера излучения резонансной воздушной полости в воде при ее возбуждении силой, имеющей вид единичной функции. Моделирование было осуществлено без изменения масштаба и подробно описано в главе VII. Результаты моделирования подтвердили сделанный ранее вывод о нерезонансном излучении эхолокационных импульсов дельфинами.

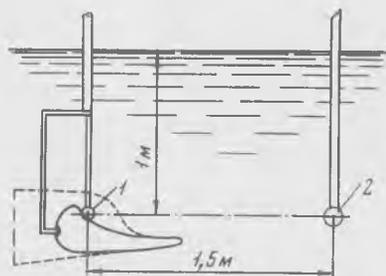


Рис. 80. Схема эксперимента

К положительным результатам привело применение метода физического моделирования также в вопросе о выяснении роли черепа и мягких тканей головы белобочки в формировании диаграмм направленности излучения (Романенко, 1964; Романенко и др., 1965). В этом эксперименте моделировался источник звука дельфина и его расположение относительно черепа и элементов

дыхательной системы. В качестве источника звука была взята сфера из пьезокерамики (диаметр 1,6 см), которая была вмонтирована в голову мертвого дельфина (рис. 80) в районе расположения воздушных мешков (трубчатых) (1). Излучатель питался импульсами напряжения от звукового генератора. Приемником звука служила сфера из пьезокерамики (2) диаметром 3 см, расположенная на расстоянии 1,5 м от излучателя. Голову дельфина с излучателем и приемник звука во время измерений располагали в воде на глубине 1 м. Диаграмма направленности исследовалась при вращении головы дельфина относительно вертикальной оси, проходящей через излучатель. Предварительно проверяли диаграмму направленности излучателя в плоскости, перпендикулярной оси держателя. Выяснено, что в рабочем диапазоне частот диаграмма круговая. Процесс измерений состоял из двух этапов. На первом этапе исследовали диаграмму направленности, формируемую целой головой дельфина (череп с мягкими тканями). В этом случае излучатель звука вводили в голову дельфина через дыхало до упора в переносицу. На втором этапе исследовали диаграмму направленности, формируемую черепом без мягких тканей. Излучатель укрепляли в том же месте, что и в предыдущем случае. Режим работы излучателя на обоих этапах был импульсный с длительностью импульсов 1 мсек. Это позволило исключить погрешности измерений за счет возможных отражений звука от поверхности воды, дна и посторонних предметов. Результаты модельных исследований находятся в согласии с данными других авторов (Norris, Evans, 1967) и будут подробно проанализированы в следующей главе.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОАКУСТИКИ ВОДНЫХ ЖИВОТНЫХ

Многие из описанных в предыдущих главах измерительных приборов и методов были разработаны и созданы специально для целей биоакустики и были использованы при проведении исследований по биоакустике рыб и дельфинов. Необходимость изучения звуков рыб диктуется прежде всего нуждами народного хозяйства. Выяснение сигнального значения звуков, издаваемых водными животными и особенно рыбами, может иметь большое практическое значение. Имитация звуков, имеющих сигнальное значение, может явиться и уже является основой для разработки акустических привлекающих и отпугивающих способов лова. Изучение сигнального значения звуков связано с общей проблемой изучения сигнализации у животных. Животные, несомненно, используют звук, чтобы повлиять на поведение других живых существ, и непосредственные наблюдения легко могут дать доказательства повторяемости и предсказуемости реакций слушающих живых организмов. Особенно четко это проявляется в экспериментах с рыбами. Это проявление, даже в его наиболее примитивном виде, можно рассматривать в качестве «связи», не вводя чрезмерных усложнений. Другой, не менее важный аспект биоакустики связан с вопросом, касающимся механизмов излучения и приема звуков животными. Громадное количество видов подводной фауны, обитающих в различных условиях, обусловило большее разнообразие в строении и работе органов излучения и приема звуков у ее представителей. Биофизическое изучение живых моделей излучателей и приемников звука представляет несомненный интерес для многих областей народного хозяйства.

Не случайно в последние годы все больше внимания уделяется биоакустике китообразных, у которых эти живые модели являются, по-видимому, наиболее совершенными. Особенно интересными и наименее изученными являются механизмы излучения звуков и формирования направленности излучения у китообразных.

Настоящая глава посвящена описанию результатов оригинальных исследований именно этих аспектов акустики дельфинов и рыб.

1. О механизме излучения звуковых сигналов дельфинами

В большом многообразии звуковых сигналов дельфинов преобладают импульсные и свистовые. О механизме их излучения известно очень немного. Известно, что они исходят из головы дельфина. Предполагают, что ответственными за процесс излучения звуков являются органы дыхания: гортань, три пары воздушных мешков, носовой проход с мускульными пробками. Мы не будем подробно анализировать каждую из существующих на этот счет гипотез. Они достаточно подробно рассмотрены во многих работах (Айрапетьянц, Константинов, 1970; Яблоков и др., 1972). Попытаемся оценить наши возможности в решении вопроса о механизме излучения звуков дельфинами.

Наиболее достоверные сведения могли бы быть получены при инструментальном проникновении в области предполагаемого расположения источника звука. Это был бы прямой метод. Однако при современном состоянии измерительной техники это пока еще невозможно.

Косвенные данные могут быть получены из анализа звуковых сигналов, излучаемых дельфином и регистрируемых вдали от дельфина. Именно этим методом и пользуются в настоящее время исследователи. Этот метод весьма ограничен, обладает недостатками, но тем не менее позволил уже получить некоторые ценные сведения о механизме излучения. Установлено, в частности, что у дельфина есть по крайней мере два независимых источника звука, что дельфин может излучать звуковые импульсы различной длительности, частоты повторения, амплитуды. Возможно, что дельфин может при необходимости изменять спектр импульсов. Однако этот метод таит в себе известную опасность. Чем дальше от дельфина зарегистрирован звуковой сигнал, тем сильнее он искажен под влиянием различных факторов: геометрической дисперсии, многолучевого характера распространения, поглощения. В звуковом импульсе все меньше остается достоверной информации о механизме излучения и все больше становится недостоверной. Это может приводить даже к ошибочным выводам.

Неудивительно, что в последние годы предпринимаются попытки регистрации звука непосредственно на голове дельфинов. Этот метод значительно труднее предыдущего, но, по-видимому, более перспективен. В звуках, зарегистрированных непосредственно на голове дельфина, по-видимому, максимум достоверной информации. Правда, это справедливо лишь в случае применения равноценной регистрирующей аппаратуры в обоих случаях. В одних работах (Baldwin, 1965; Ивенс и др., 1965) регистрация звуковых сигналов дельфинов непосредственно на голове осуществлялась методами радиотелеметрии, в других (Diercks a. oth., 1971) — с помощью проводной связи. В первых двух работах не приведено никаких результатов о механизме излучения, резуль-

таты же последней работы интересны, но немногочисленны и не позволяют сделать решающих выводов о механизме излучения. Методика измерений (передача информации с дельфина на берег к регистрирующей аппаратуре по проводам) исключает свободное поведение животного и затрудняет процесс измерений.

В наших исследованиях нашли применение два метода измерений. Один из них основан на использовании автономной регистрирующей аппаратуры (магнитофон), закрепляемой на самом

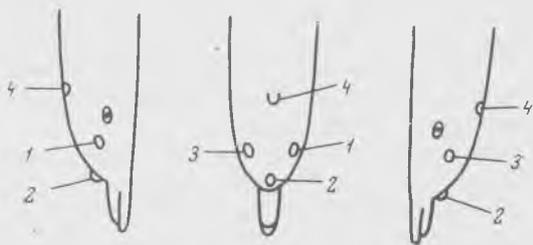


Рис. 81. Первая схема расположения гидрофонов

1 — гидрофон № 1; 2 — гидрофон № 2; 3 — гидрофон № 3; 4 — дыхало

дельфине. Другой метод — радиотелеметрия (метод радиотелеметрии подробно описан в главе V). Эти методы позволили работать со свободно плавающим дельфином и существенно облегчили процесс регистрации информации.

Процесс измерений по первому из упомянутых методов сводится к следующему. Три миниатюрных широкополосных гидрофона закрепляют с помощью присосок на голове дельфина в области предполагаемого расположения звукоизлучающих органов (см. рис. 70 и 81). Сигналы с гидрофонов поступают по экранированным проводам на входы трехканального магнитофона и регистрируются на звуконоситель в полосе частот от 100 гц до 120 кгц. Трехканальный магнитофон специально сконструирован и изготовлен в малогабаритном, экономичном и автономном варианте и крепится непосредственно на дельфине — на его спинном плавнике (описание магнитофона дано в главе IV). Запись осуществляется под водой при свободном плавании дельфина в ограниченной акватории. Работой магнитофона управляют по радио. Такая методика позволила выяснить, какова амплитуда и форма звуковых сигналов в различных точках на поверхности головы дельфина. При этом использовали три схемы расположения гидрофонов.

Первая схема показана на рис. 81. Гидрофоны № 1 и 3 регистрируют звуки, излучаемые влево и вправо от продольной оси дельфина. Гидрофон № 2 — звуки, излучаемые вперед. Расстояние между гидрофонами № 1 и 2, а также гидрофонами № 2 и 3 равно 15 см по поверхности тела дельфина.

Вторая схема расположения гидрофонов показана на рис. 82. Гидрофоны № 1 и 3 расположены непосредственно над вестибулярными воздушными мешками дыхательной системы. Гидрофон № 2 — впереди дыхала на расстоянии 7—8 см.

Третья схема расположения гидрофонов показана на рис. 83. Гидрофон № 1 располагался впереди дыхала на расстоянии 7—8 см, гидрофон № 3 — в области гортани дельфина, гидрофон № 2 — на боковой части лобного выступа с правой стороны.

При расположении гидрофонов по первой схеме были зарегистрированы как импульсные, так и свистовые сигналы. Характерно, что уровень свистовых сигналов на левой стороне головы дельфина оказался ниже на 12—15 дБ, чем на правой. Подобный результат ранее отмечался Лилли (Lilly, 1962).

На рис. 84 показаны высокочастотные звуковые импульсы из одной и той же серии, зарегистрированные при расположении гидрофонов по первой схеме (см. рис. 81). Импульсы верхнего, среднего и нижнего рядов зарегистрированы гидрофонами № 1, 2 и 3 соответственно. Приведены не все импульсы серии (серия состоит примерно из 90 импульсов). Номера, характеризующие положение импульсов в серии, показаны сверху.

Легко заметить, что форма импульсов в пределах одной серии не остается неизменной. Импульсы, распространяющиеся вперед (принятые гидрофоном № 2), длиннее импульсов, излучаемых в боковых направлениях, и имеют более сложную форму. Кроме того, начальная фаза импульсов, принятых гидрофоном № 3 (нижний ряд), изменяется в широких пределах. Фаза импульсов № 2 и 58 отличается примерно на 90° , а импульсов № 2 и 63 — на 180° .

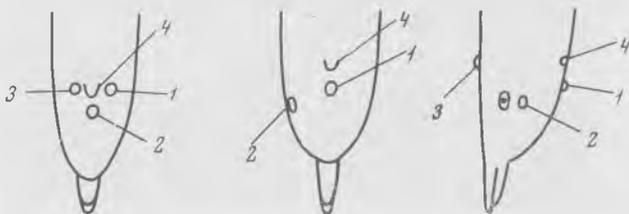


Рис. 82. Вторая схема расположения гидрофонов
Обозначения те же, что на рис. 81

Рис. 83. Третья схема расположения гидрофонов
Обозначения те же, что на рис. 81

Помимо высокочастотных импульсов, показанных на рис. 84, в эксперименте, характеризуемом расположением гидрофонов по первой схеме, были зарегистрированы низкочастотные импульсы, обычно называемые ориентационными. Главная особенность низкочастотных импульсов заключается в том, что их уровень значительно выше, чем уровень высокочастотных, а в спектре частот преобладают частоты, измеряемые сотнями герц.

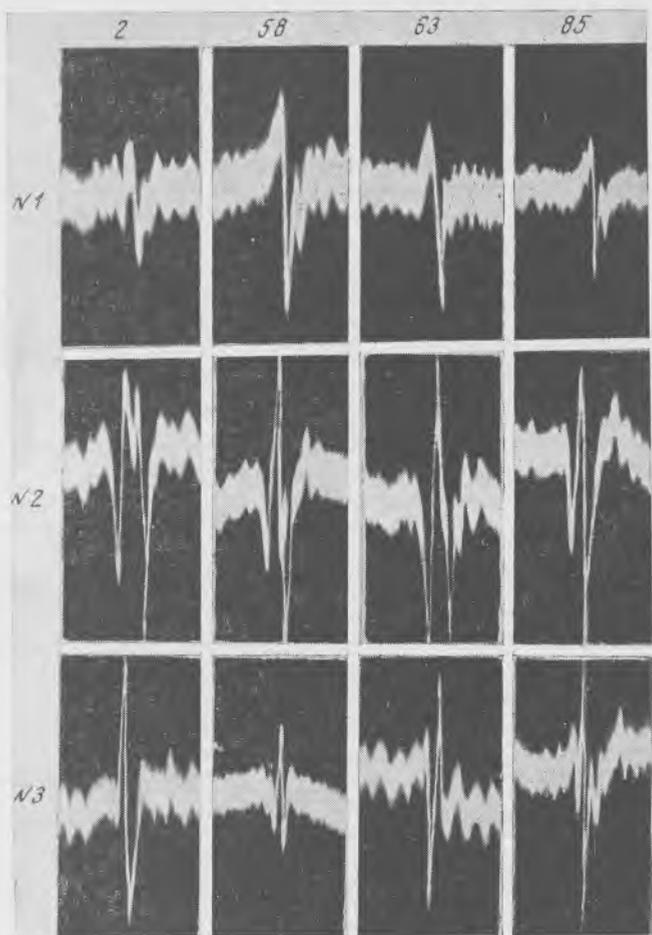


Рис. 84. Эхолокационные импульсы афалины

В результате измерений при расположении гидрофонов по второй схеме установлено, что гидрофон № 2 регистрировал импульсы и свистовые сигналы дельфина, в то время как гидрофон № 1 регистрировал лишь свистовые сигналы, а гидрофон № 3 не регистрировал никаких сигналов. Это свидетельствует о том, что вестибулярные мешки, по-видимому, не участвуют в образовании локационных сигналов.

В результате эксперимента при расположении гидрофонов по третьей схеме (см. рис. 83) установлено, что гидрофоны № 1 и 2 регистрируют импульсные и свистовые сигналы, тогда как гидрофон № 3 никаких сигналов не регистрирует. Этот эксперимент

был проведен трижды с различными гидрофонами (миниатюрными цилиндрическими и плоскими с максимальным размером, не превышающим 5 мм) с неизменным результатом. Напрашивается вывод о том, что гортань не является источником звука.

Наиболее интенсивные низкочастотные импульсы были зарегистрированы при расположении гидрофона впереди дыхала на расстоянии 7—8 см (гидрофон № 2 на рис. 82 и гидрофон № 1 на рис. 83). На рис. 85, *а* показан типичный низкочастотный импульс. Волнистость нулевой линии обусловлена наложением на полезный сигнал синусоидального сигнала калибровки длительности. Один период калибровочного сигнала равен 800 мксек. (Оценка показывает, что длительность низкочастотного импульса составляет около 5 мсек.) Примечательно, что дельфин может очень легко перейти от излучения низкочастотных импульсов к излучению высокочастотных или других низкочастотных с меньшим содержанием низких частот. На рис. 85, *б* показан низкочастотный импульс с меньшим, чем в предыдущем случае, содержанием низких частот. На рис. 85, *в* приведен один из высокочастотных импульсов, которые дельфин начал излучать сразу же после импульсов, изображенных на рис. 85, *б*, без видимого перехода и практически не меняя частоты следования. Импульсы же, изображенные на рис. 85, *б*, дельфин излучал сразу же за импульсами, показанными на рис. 85, *а*, также без заметного изменения режима излучения, но с увеличением частоты следования приблизительно в 2 раза.

Низкочастотные импульсы характеризуются следующими особенностями:

1) период колебаний в пределах импульса увеличивается от начала импульса к концу и может составлять несколько миллисекунд, что соответствует частотам в сотни герц;

2) в пределах одной и той же серии низкочастотные импульсы могут отличаться по фазе на 180° (см. рис. 85, *а* и *б*);

3) каждый низкочастотный импульс без исключения начинается с высокочастотного, длительность которого около 50 мксек.

Помимо описанных импульсных и свистовых звуков дельфины издают и некоторые другие звуки, напоминающие криканье, рычанье и т. п. На настоящем этапе исследования они представляются менее интересными, чем импульсные и свистовые, и мы в дальнейшем обсуждении на них останавливаться не будем.

Обсуждение результатов мы начнем с попытки объяснить очень интересный факт, заключающийся в том, что высокочастотные импульсы, излучаемые в боковых направлениях, короче импульсов, распространяющихся вперед (см. рис. 84). Импульсы, распространяющиеся в боковых направлениях, по нашему мнению, короче ввиду того, что они не удлиняются и не искажаются за счет отраженных импульсов, ибо в боковых направлениях кости черепа не отражают (или почти не отражают) звука. По этой причине импульсы, излучаемые в боковых направлениях, по-видимому,

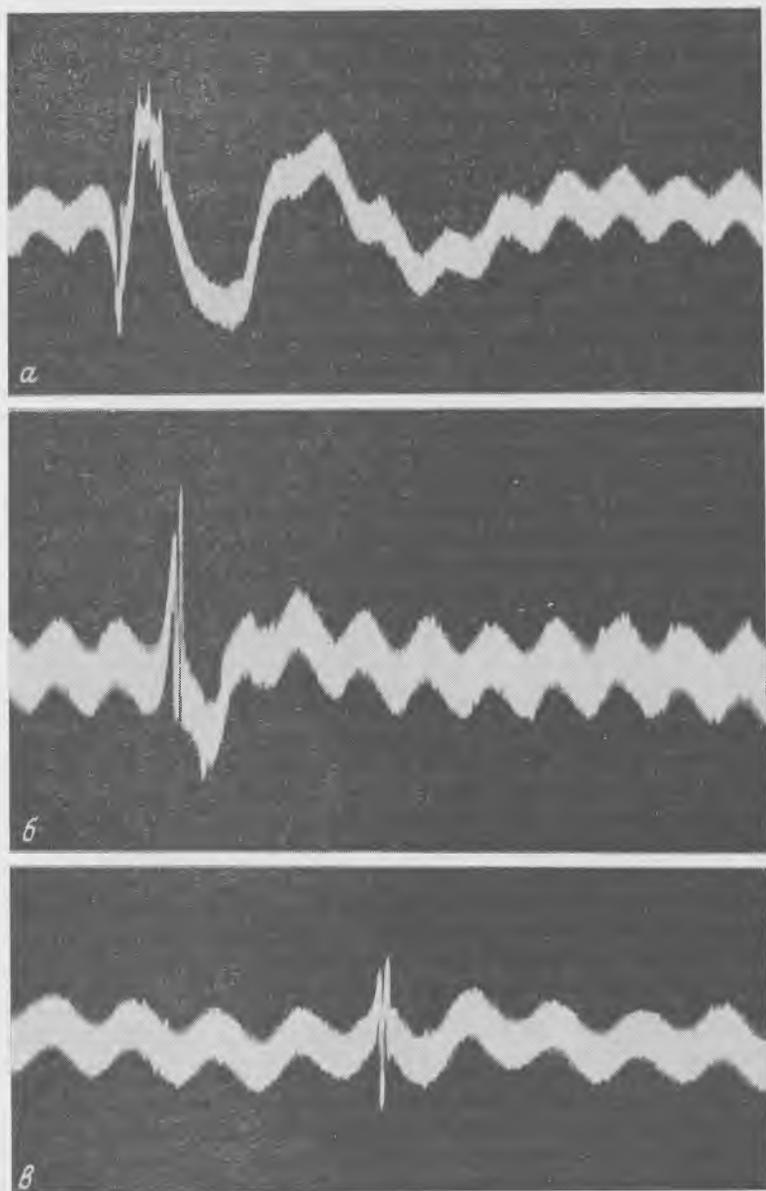


Рис. 85. Низкочастотные (а и б) и высокочастотный (в) импульсы



Рис. 86. Общий вид воздушных шариков (а), вся система в сборке (б)

наиболее близки по форме к истинным генерируемым импульсам. Анализ формы именно боковых импульсов (излучаемых в боковых направлениях) позволяет сделать вывод о нерезонансном механизме генерации эхолокационных сигналов. В связи с этим представляется маловероятным участие воздушных мешков как резонаторов в процессе излучения эхолокационных сигналов. Однако, поскольку гипотеза резонансного механизма излучения у дельфинов довольно прочно вошла в литературу благодаря Лилли и Миллер (1961а), мы сочли целесообразным поставить специальный модельный эксперимент по выяснению характера излучения резонансной воздушной полости в воде при ее ударном возбуждении. В качестве резонансной воздушной полости был взят воздушный шарик, выдутый из тонкой резины, диаметром около 3 см и почти сферической формы. Для того чтобы ударно возбудить такой шарик, внутрь него был помещен другой резиновый шарик меньшего размера, выдутый так же, как и первый. На рис. 86, а показаны фотографии таких шариков. На рис. 86, б показана вся система шариков в собранном виде. В месте завязки большего шарика воткнута швейная игла, предназначенная для прокалывания внутреннего шарика. Всю систему шариков помещают в воду на глубину 25—30 см (аквариум размером 200 см × 50 см × 50 см) и располагают миниатюрный широкополосный гидрофон на расстоянии 7—10 см от шарика. В момент прокалывания внутреннего шарика в большем шарике давление резко возрастает. При этом в воду излучается акустический импульс, регистрируемый тем же гидрофоном и записываемый на тот же магнитофон, на который записывались локационные импульсы.

На рис. 87 показана фотография излученного импульса. Отчетливо виден затухающий колебательный характер импульса. Причем подчеркиваются две частоты: примерно 250 гц и 4—6 кгц. Первая частота излучается при колебаниях шарика, как резонансной системы с сосредоточенными параметрами: масса — присоединенная масса воды, упругость — воздух внутри шарика. Вторая частота возникает при колебаниях воздуха внутри шарика, как в жесткой сфере. Наличие таких колебаний обусловлено большой



Рис. 87. Импульс, излученный воздушным шариком

разницей акустических сопротивлений воды и воздуха. (Математический расчет такой колебательной системы приведен ниже.) Очевидна разница в форме эхолокационных импульсов дельфина и импульса, излученного ударно возбужденной воздушной полостью. Это подтверждает вывод, сделанный ранее, о нерезонансном характере излучения высокочастотных импульсов дельфина.

Для объяснения формы импульсов, распространяющихся вперед (средний ряд импульсов на рис. 84), можно предположить следующий механизм формирования (рис. 88) (Романенко, 1973). Будем считать, что источник эхолокационных импульсов находится в области трубчатых воздушных мешков (это предположение не ново, оно неоднократно высказывалось в литературе) и излучает импульсы, подобные изображенным в третьем ряду рис. 84. Импульсы от источника распространяются во все стороны. Импульсы, излученные вперед и в стороны, распространяются беспрепятственно. Импульсы, излученные вниз, отражаются от премаксиллярных мешков и направляются вперед, суммируясь с импульсами, излученными вперед. На рис. 88 для наглядности показаны только импульсы, распространяющиеся вперед и вниз. Отражение импульса, излученного вниз, от премаксиллярного мешка происходит с поворотом фазы на 180° и с задержкой по времени. При сложении ушедшего вперед импульса с отраженным формируется импульс, похожий на многие из тех (например, № 2), что зарегистрированы гидрофоном № 2. Большинство других импульсов также могут быть, по-видимому, получены по описанной схеме. Предложенная схема не может считаться строгой, она лишь поясняет возможный принцип формирования эхолокационных импульсов. Следует учесть, что источников импуль-

сов может быть не один, а, по крайней мере, два, и излучать они могут импульсы, несколько различающиеся по форме, амплитуде и фазе. Кроме того, импульс формируется не только черепом и премаксиллярными мешками, но также мягкими тканями и всей системой надчерепных воздухоносных путей. Тогда могут получить объяснение различия в форме импульсов верхнего и нижнего рядов, а также дополнительные усложнения формы импульсов среднего ряда (см. рис. 84). Несомненно, что для развития и уточнения

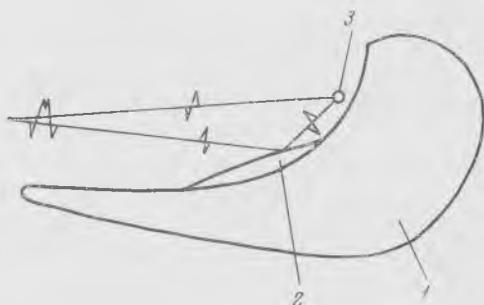


Рис. 88. Схема формирования эхолокационного импульса

1 — череп дельфина; 2 — премаксиллярный мешок; 3 — источник звука

предложенной схемы необходимы дальнейшие систематические исследования.

Сделанный выше вывод о нерезонансном механизме излучения эхолокационных импульсов не исключает вообще возможности участия воздушных мешков в процессе излучения. Воздушные мешки могут принимать участие как нерезонансные объемы воздуха (сильно деформированные, не имеющие центров и плоскостей симметрии). В таком случае кратковременное вдувание в них через сфинктеры (или выдувание) порций воздуха должно приводить к нерезонансному излучению импульсов давления. Оценим, каким должен быть расход воздуха (количество воздуха, вдуваемого в излучающую полость) для излучения одной эхолокационной серии из 100 импульсов. При этом для простоты расчета мы будем предполагать, что полость имеет форму сферы радиуса $a=1$ см (но не обладает резонансными свойствами) и в нее вдуваются порции воздуха с объемной скоростью, меняющейся по закону

$$\left. \begin{aligned} Q &= 0 && \text{при } t < -\frac{T}{2} \\ Q &= Q_0(1 + \cos \omega t) && \text{при } -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} \\ Q &= 0 && \text{при } t > \frac{T}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (175)$$

Частоту вдувания будем считать равной частоте следования импульсов в серии. На рис. 89, а показан закон изменения объемной скорости в течение одного импульса. Длительность одного

импульса примем равной $T = 50$ мксек. Мы рассматриваем так называемый точечный источник, т. е. источник, размеры которого малы по сравнению с пространственной длиной излучаемого импульса. В этом случае волна давления на расстоянии r от центра точечного источника будет определяться выражением (Морз, 1949):

$$P \approx - \frac{\rho}{4\pi r} \cdot \frac{dQ}{dt}, \quad (176)$$

где

$$\frac{dQ}{dt} = - \omega Q_0 \sin \omega t. \quad (177)$$

Здесь функция Q представляет собой мгновенную величину объемной скорости среды по направлению от центра источника. Форма

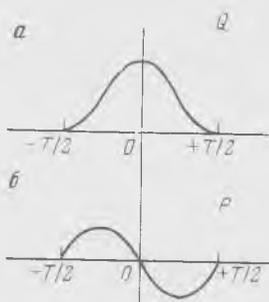


Рис. 89. График изменения объемной скорости (а) и давления (б) от времени

волны давления при выбранном законе изменения объемной скорости (175) показана на рис. 89, б. Будем считать, что на поверхности излучающей сферы амплитуда давления равна $P_0 = 10^5$ бар. Объем воздуха, вдуваемый в излучающую полость за время одного импульса, равен

$$V_{\text{имп}} = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} Q(t) dt = Q_0 T. \quad (178)$$

Значение Q_0 получим из (176) и (177)

$$Q_0 = \frac{2P_0 a T}{\rho}. \quad (179)$$

Тогда

$$V_{\text{имп}} = \frac{2P_0 a T^2}{\rho} \cong 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3. \quad (180)$$

При 400 импульсах в серии расход воздуха составит

$$V_{\text{сер}} \cong 6 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3. \quad (181)$$

Полученный результат показывает, что при излучении дельфином эхолокационных серий расход воздуха оказывается незначительным. Становится понятным, как дельфины могут излучать очень длинные серии и даже несколько серий подряд без изменений режима излучения.

Теперь обратимся к низкочастотным импульсам. Характерной особенностью низкочастотных импульсов, показанных на рис. 85, *а*, *б*, является их колебательный характер. Это соответствует высказанному ранее Лилли и Миллер (1961а) предположению о резонансном механизме возбуждения звуковых импульсов у дельфинов, но лишь в части, касающейся низкочастотных импульсов. Что же касается высокочастотных эхолокационных импульсов, то, как было показано ранее, механизм их излучения не является резонансным.

Резонансной системой, излучающей низкочастотные импульсы, может служить воздушный мешок и окружающие его ткани, ударно возбуждаемые некоторой силой. Такая система может рассматриваться как система с сосредоточенными параметрами. Ее резонансная частота определяется выражением (Андреева, 1964):

$$\omega_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{3\gamma P + 4\mu_1}{\rho}}, \quad (182)$$

где ρ — плотность воды; $\gamma = 1,4$ для воздуха; P — статическое давление; R — радиус воздушной полости (эквивалентной сферы); μ_1 — действительная часть комплексного модуля сдвига окружающих тканей, определяемого из

$$\mu = \mu_1(1 + i\mu_2), \quad (183)$$

где $\mu_1 \cdot \mu_2$ — мнимая часть. По предварительным данным (Лебедева, 1965; Вестон, 1970), для тканей рыб в диапазоне частот, измеряемых единицами килогерц, μ_1 составляет величину порядка 10^5 дин/см². Для тканей дельфина модуль сдвига не известен, но будем считать, что он того же порядка. В этом случае влияние упругости тканей на резонансную частоту воздушного мешка не существенно и вторым членом под корнем в соотношении (182) можно пренебречь. Полагая, что $P = 1$ атм; $f = 500$ гц (резонансная частота берется равной средней частоте колебаний в импульсе на рис. 85, *а*), можно показать, что радиус резонирующей воздушной сферы должен быть около 1 см. Это вполне соответствует реальным размерам воздушных мешков дельфинов.

Однако есть один факт, который на первый взгляд трудно объяснить, исходя из предположенного механизма излучения. Это непостоянство периода колебаний в пределах импульса (см. рис. 85, *а*). Период колебаний заметно увеличивается (примерно в 2 раза) в течение импульса. Трудно представить себе резонансную систему, частота колебаний которой изменялась бы вдвое за время одного периода колебаний. Однако это оказывается возможным, если недобротная резонансная колебательная система возбужда-

ется неперриодической силой. Расчеты показывают, что в этом случае первые несколько периодов колебаний возбужденной системы имеют неодинаковую величину, причем период увеличивается со временем.

Для примера проанализируем поведение недобротной резонансной механической системы с сосредоточенными параметрами, возбужденной силой, меняющейся по закону

$$F = 1 - e^{-at^2}, \quad (184)$$

где a — характеризует скорость нарастания силы; t — время. Графически закон изменения силы показан на рис. 90. Именно

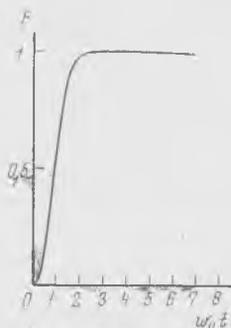


Рис. 90. Закон изменения возбуждающей силы

такой моделью в первом приближении может быть представлена предполагаемая излучающая система дельфина, состоящая из воздушного мешка, окруженного мышечными структурами и возбуждаемого одним из двух мыслимых способов: кратковременным вдуванием в мешок порции воздуха или сжатием окружающих его мышц (Романенко, 1972).

Для определения характера смещения механической системы возбужденной описанной выше силой, воспользуемся методом интеграла Дюамеля, который возьмем в следующей форме

$$Y(t) = X(0)h(t) + \int_0^t X'(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (185)$$

где $X(t)$ — функция воздействия на систему; $Y(t)$ — функция отклика системы при данном воздействии; $h(t)$ — переходная функция системы, представляющая собой отклик системы на воздействие силы в виде единичной функции. Переходная характеристика простой механической колебательной системы с сосредоточенными параметрами имеет вид (Морз, 1949)

$$h(t) = \frac{1}{K} \left[1 - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cos(\omega t - \alpha) \right], \quad (186)$$

где ω_0 — резонансная частота системы при отсутствии потерь, определяемая как

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (187)$$

K — жесткость системы; m — масса; ω — частота колебаний системы с учетом потерь, определяемая как $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; δ — величина, характеризующая потери в системе; α — фаза колебаний, определяемая соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta}{\omega}. \quad (188)$$

Учитывая, что при $t = 0$, $X(0) = 0$, интеграл Дюамеля запишем в виде

$$Y(t) = \frac{2a}{K} \int_0^t \tau e^{-a\tau^2} \left\{ 1 - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta(t-\tau)} \cos[\omega(t-\tau) - \alpha] \right\} d\tau. \quad (189)$$

На рис. 91, *a* показан результат численного интегрирования, представляющий собой смещение системы под действием вынуждающей силы. Расчет выполнен при следующих значениях параметров: $a = 1 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-2}$, $\omega_0 = 4000 \text{ сек}^{-1}$, $\delta = 0,44 \omega_0$. Параметры выбраны так, чтобы длительность вынуждающей силы составляла примерно 0,5 мсек, добротность колебательной системы была такой же, как у дельфина (около 2—3), а частота — около 500—600 гц.

Помня, что в интересующем нас случае размер излучающей системы значительно меньше длины звуковой волны в среде, воспользуемся для определения формы волны давления соотношением (176). Можно считать, что форма волны давления на поверхности

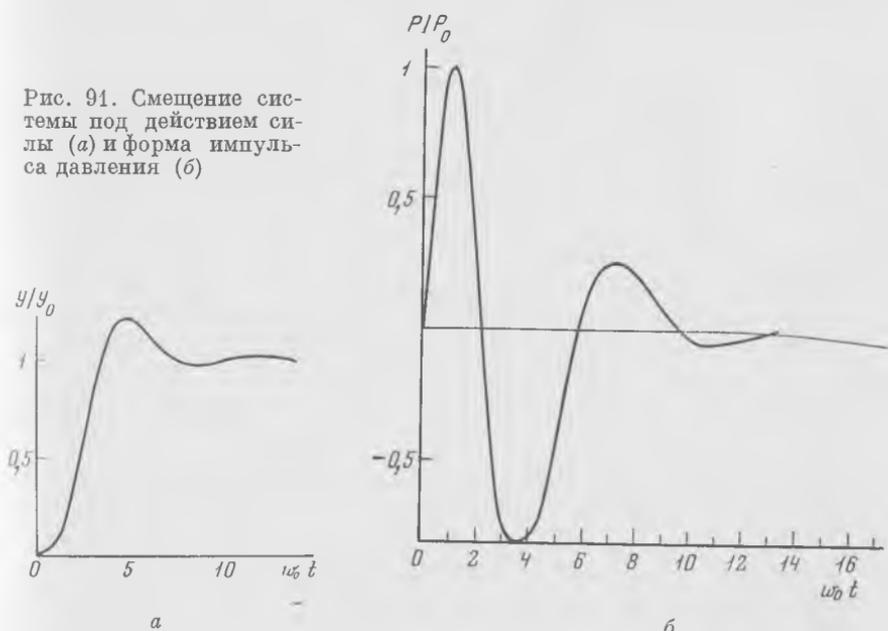


Рис. 91. Смещение системы под действием силы (*a*) и форма импульса давления (*б*)

излучателя определяется формой второй производной от смещения поверхности, которая имеет вид, показанный на рис. 91, б. Нетрудно заметить, что форма рассчитанной кривой давления неплохо соответствует реальной форме давления (см. рис. 85, а). Таким образом, находит объяснение первая из перечисленных выше особенностей низкочастотных импульсов.

Вторую особенность, заключающуюся в том, что низкочастотные импульсы могут отличаться по фазе на 180° , можно объяснить тем, что импульсы, отличающиеся по фазе, излучаются при воздействии на колебательную систему в одном случае мышечного удара (воздействие начинается с фазы сжатия воздушной полости), а в другом случае — кратковременного вдувания воздуха в воздушную полость (воздействие начинается с фазы расширения).

Третью особенность, заключающуюся в том, что каждый низкочастотный импульс начинается с высокочастотного, объяснить пока трудно,

Интересный вариант описанной выше модели рассмотрен Гиро и Дубровским (1973). В их расчете учтены сдвиговые колебания окружающих воздушный мешок тканей. Однако их описание не отражает одной из основных особенностей низкочастотного импульса — непостоянства периода колебаний в импульсе.

Свистовые сигналы дельфинов являются в значительной степени гармоническими в отличие от эхолокационных. Это позволяет предположить, что в их излучении принимают участие резонирующие элементы. В дыхательной системе дельфина такими резонирующими элементами могут служить воздушные мешки и отдельные участки наружного носового прохода. Однако, в отличие от предыдущего случая, в котором мы рассматривали колебания системы с сосредоточенными параметрами, при излучении свистовых сигналов совершает колебания система с распределенными параметрами. Об этом свидетельствует спектр частот свистовых сигналов, включающий в себя частоты порядка десяти килогерц. Воздушные полости, имеющие размеры порядка единиц сантиметров, могут излучать частоты порядка десяти килогерц лишь в том случае, если воздух в них колеблется как в объемах, ограниченных жесткими стенками.

Представляется интересным рассмотреть математическую модель излучения дельфином свистовых сигналов. С этой целью аппроксимируем воздушные мешки сферическими объемами воздуха, а участки носового прохода — цилиндрическими. Другие типы резонаторов (в виде куба, параллелепипеда и т. п.) у китообразных, по-видимому, немислимы. Поэтому рассмотрим две задачи о собственных колебаниях сферического и цилиндрического объемов воздуха в жестких границах.

1. *Собственные колебания воздуха внутри сферической оболочки радиуса r_0 с нулевыми граничными условиями.* Эта задача сводится к отысканию решения уравнения

$$\Delta\varphi + k^2\varphi = 0, \quad (190)$$

где φ — потенциал скорости; Δ — оператор Лапласа.

$$k = \frac{2\pi f}{c} \quad (191)$$

f — частота; c — скорость звука в воздухе. Граничное условие на поверхности сферы

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0 \quad (192)$$

обозначает отсутствие нормальной компоненты (n) скорости на границе воздушного объема. Нулевое граничное условие обусловлено тем, что водоподобные стенки сферы являются акустически жесткими по сравнению с воздухом внутри сферы.

Решение уравнения (190) при выполнении условия (192) возможно только для определенного ряда значений k , которые определяют типы соответствующих нормальных колебаний и их частоты (Лэмб, 1960; Рэлей, 1955; Морз, 1949). Оно имеет довольно громоздкий вид и по этой причине здесь не приводится, но свидетельствует о наличии нескольких типов колебаний, характеризующихся соответствующими наборами собственных частот (обертонов). Мы ограничимся рассмотрением наиболее интересных первых двух типов колебаний. Они интересны тем, что должны излучаться более эффективно, чем другие типы колебаний, и по этой причине легче всего могут быть обнаружены.

Здесь необходимо сделать некоторые пояснения. Выше мы предполагали, что стенки воздушных объемов жестки. Строго говоря, абсолютно жесткие стенки исключают всякую возможность излучения. Однако в нашем случае стенки не абсолютно жестки: они достаточно жестки, чтобы можно было применять сравнительно простой математический аппарат при решении задачи о собственных колебаниях воздушных объемов, но недостаточно жестки, чтобы исключить возможность излучения звука колеблющимися объемами.

Теперь вновь возвратимся к рассмотрению типов колебаний.

При первом типе колебаний воздух внутри сферической оболочки колеблется симметрично в радиальном направлении. Собственные частоты колебаний в этом случае определяются корнями трансцендентного уравнения

$$\operatorname{tg} k_{mn}r_0 = k_{mn}r_0 \quad (193)$$

при $m = 1$ и $n = 1, 2, 3, \dots$. Здесь m — тип колебания; n — номер обертона. Первые три корня равны

$$k_{11}r_0 = 1,4303\pi; \quad k_{12}r_0 = 2,459\pi; \quad k_{13}r_0 = 3,4709\pi. \quad (194)$$

При втором типе воздух колеблется в сфере из стороны в сторону, как в случае закрытой с двух сторон трубы. Собственные час-

тоты колебаний в этом случае определяются корнями уравнения

$$\operatorname{tg} k_{mn} r_0 = \frac{2k_{mn} r_0}{2 - k_{mn}^2 r_0^2} \quad (195)$$

при $m = 2$ и $n = 1, 2, 3, \dots$. Первые три корня равны

$$k_{21} r_0 = 0,6625\pi; \quad k_{22} r_0 = 1,891\pi; \quad k_{23} r_0 = 2,930\pi. \quad (196)$$

Наиболее эффективно должны излучаться колебания первого типа (пульсирующий источник). Менее эффективно — колебания второго типа (осциллирующий источник). Еще менее эффективно излучение колебаний более высоких типов. Поэтому мы не будем останавливаться на них.

Характерной особенностью колебаний сферического объема воздуха в жестких стенках является отсутствие гармоник (обертонов, кратных основному тону).

Теперь рассмотрим вторую задачу.

2. *Собственные колебания цилиндрического воздушного объема, заключенного в жесткую оболочку радиуса r_0 и высоты l с нулевыми граничными условиями.* Эта задача сводится к отысканию решения того же уравнения (190), записанного в цилиндрической системе координат, с граничными условиями на боковой и торцовых поверхностях цилиндра

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0 \quad (197)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z = 0 \text{ и } z = l. \quad (198)$$

Решение уравнения (190) для цилиндрического объема (здесь не приводится) так же, как и в предыдущем случае, свидетельствует о существовании большого количества типов колебаний. Мы рассмотрим лишь наиболее интересные с точки зрения эффективности их излучения и возможности обнаружения. К ним относятся прежде всего радиальные колебания первого типа, частоты которых определяются выражением

$$f_{rm} = \frac{\alpha_m \cdot c}{2r_0} \quad (199)$$

Для первых четырех частот

$$\alpha_1 = 1,2197; \quad \alpha_2 = 2,2331; \quad \alpha_3 = 3,2383; \\ \alpha_4 = 4,2411. \quad (200)$$

В этом типе колебаний отсутствуют гармоники (обертоны, кратные основному тону).

Второй интересный тип колебаний представляет собой продольные колебания воздуха в цилиндрическом объеме (вдоль оси

цилиндра). Их частоты определяются соотношением

$$f_{zn} = \frac{n \cdot c}{2l} \quad (201)$$

при]

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (202)$$

Видно, что продольные колебания заключают только гармоники основного тона.

Третий тип колебаний, которые также представляют интерес, называют обычно смешанным. Его частоты определяются соотношением

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{r_0}\right)^2} \quad (203)$$

В этом случае воздух колеблется как в продольном, так и в радиальном направлении.

Несколько слов об особенностях колебаний цилиндрического объема. Во-первых, если высота цилиндра l короче, чем $1,71 r_0$, то колебание с наименьшей частотой будет представлять собой поперечное колебание воздуха с узловой диаметральной плоскостью; при этом воздух «качается» из стороны в сторону поперек цилиндра. Излучение цилиндра на этой частоте имеет дипольный характер. Во-вторых, при одинаковых основных размерах цилиндра и сферы самая низкая собственная частота цилиндра всегда ниже соответствующей частоты сферы (их соотношение приблизительно равно 3 : 4). Образно говоря, цилиндр звучит на басовых нотах по сравнению со сферой равных размеров.

Кроме цилиндра, закрытого на торцах, представляет интерес рассмотреть также продольные колебания воздуха в цилиндре, закрытом на одном конце и открытом на другом. В отличие от случая полностью закрытого цилиндра, когда частоты продольных колебаний составляют гармонический ряд (присутствуют как четные, так и нечетные гармоники), колебания цилиндра, открытого на одном конце, содержат преимущественно нечетные гармоники. Четные гармоники при этом могут либо отсутствовать совсем, либо иметь очень малую интенсивность по сравнению с нечетными. Если цилиндр открыт на обоих концах, то, как и в случае полностью закрытого цилиндра, частоты собственных продольных колебаний воздуха в нем составляют гармонический ряд.

Обратимся к экспериментальным данным с целью сравнить их с результатами проведенного расчета.

Сонограмма на рис. 92, характеризующая динамику частотных составляющих свистового сигнала афалины, свидетельствует о том, что спектр частот свиста содержит как четные, так и нечетные гармоники и не содержит некротных обертонов. Такой звук может излучать из двух возможных (сферического и цилиндрического) объемов

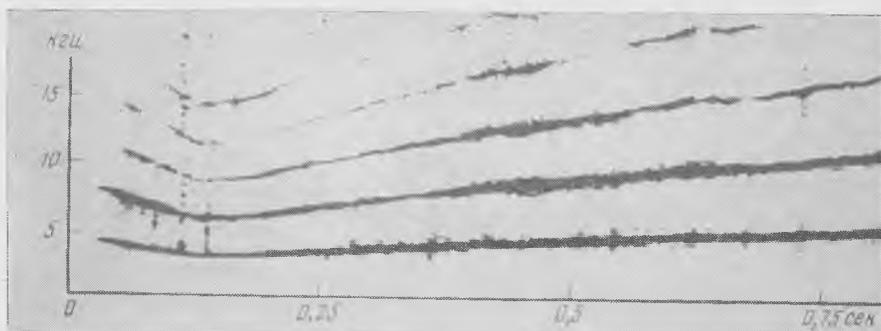


Рис. 92. Свистовой звук афалины

только цилиндрический объем воздуха, замкнутый (или открытый) на торцах и колеблющийся вдоль оси цилиндра. Радиальные колебания цилиндрического объема либо не возбудились, либо возбудились очень слабо и не обнаружены регистрирующей аппаратурой. В структуре надчерепных дыхательных путей китообразных вообще и дельфинов, в частности, цилиндрическим излучателем звука может служить участок дыхала между мускульными пробками. В зависимости от того, имеется ли из этого участка один выход для воздуха или два, будет излучаться звук, содержащий только нечетные гармоники или полный гармонический ряд. В литературе есть указания на то, что китообразные способны в отличие от описанных выше звуков издавать также звуки, в которых преобладают преимущественно нечетные гармоники (Fish a. Mowbray, 1962; Busnel a. Dziedzic, 1966; Айрапетьянц, Константинов, 1970).

Если звук, спектр которого изображен на рис. 92, излучается цилиндрическим объемом, то высота цилиндра, оцененная по формуле (201), должна быть равна приблизительно 3 см. Это вполне соответствует реальным размерам участка дыхала афалины между мускульными пробками.

При наблюдении за афалиной в момент свиста можно иногда видеть, как из дыхала выделяются тонкие струйки мелких пузырьков воздуха. Это свидетельствует о том, что в дыхале в этот момент находится воздух под значительным давлением.

Есть основания считать, что в процессе излучения свистов китообразными участвуют не только продольные колебания цилиндрических объемов воздуха, но также и радиальные. Не исключено также участие и сферических резонансных объемов. К таким предварительным выводам можно прийти, анализируя экспериментальные данные цитированных выше работ, а также работу Златоустовой и Низовой (1971). Однако окончательный вывод можно будет сделать только после тщательного анализа большого объема экс-

периментальных данных. При этом, несомненно, выяснятся интересные особенности, которые помогут уточнить рассмотренную математическую модель и полнее разгадать механизм излучения.

По-видимому, очень полезной для выяснения механизма излучения может оказаться методика регистрации свистовых сигналов непосредственно на голове дельфина (Романенко, Чикалкин, 1974; Романенко и др., 1974). При таком методе регистрации могут быть обнаружены даже самые слабые обертоны, которые позволят более точно определить тип излучателя. Дело в том, что не все допустимые частоты собственных колебаний объемов воздуха эффективно излучаются. При регистрации свистов вдали от дельфина многие слабые обертоны оказываются ниже уровня окружающих шумов и по этой причине не обнаруживаются.

Несколько слов следует сказать о возможном механизме перераспределения энергии звука в свистовых сигналах китообразных между различными гармониками. Известно (Fish а. Mowbray, 1962; Марков, Островская, 1973), что иногда в процессе излучения свистового сигнала максимум энергии звука, приходившийся в начале сигнала на основной тон, перемещается («перепрыскивается») в пределах длительности сигнала на одну из гармоник. Аналогичное явление хорошо известно музыкантам, и в музыкальной акустике называется «передуванием» музыкального инструмента (трубы, органа). Осуществляется оно следующим образом. Когда давление воздуха в мехах органа увеличивается и струя воздуха получает большую скорость, то частота колебаний струи вначале удерживается силами связи (акустической) вблизи основного тона трубы. Но когда, при увеличении скорости струи воздуха, частота ее собственных колебаний приближается к очередной гармонике (или обертону), то тон трубы внезапно изменяется и «перескакивает» на новую частоту.

Поскольку у китообразных цилиндрические образования в дыхательной системе, по-видимому, играют решающую роль в процессе излучения свистовых сигналов, приведенное выше объяснение явления «перепрыска» энергии в спектре представляется весьма правдоподобным.

2. Направленность излучения звуков дельфинами

Первые, достаточно аргументированные указания на то, что излучение звука дельфинами характеризуется заметной направленностью, содержатся в работе (Norris а. oth., 1961). Авторы этой работы регистрировали звуки дельфинов с помощью гидрофона, чувствительного к звуковым колебаниям в узком диапазоне частот в области 100 кгц. Было отмечено, что гидрофон воспринимает звуки дельфина наиболее эффективно, когда голова дельфина направлена строго на гидрофон. Кроме того, авторы упомина-

нутой работы выяснили способность дельфина обнаруживать куски рыбы, располагаемые в различных местах в воде около его головы. Результаты представлены на рис. 93, где схематически отмечена та область (1) перед головой дельфина, в которой дельфин, лишенный зрения (с присосками на глазах), быстро обнаружил куски рыбы; в другой (2) дельфин не сразу находил рыбу, а в остальных случаях (3) вообще не обнаруживал рыбу.

Эванс и Прескотт (Evans, Prescott, 1962) высказали предположение, что направленность излучения звуков дельфинами

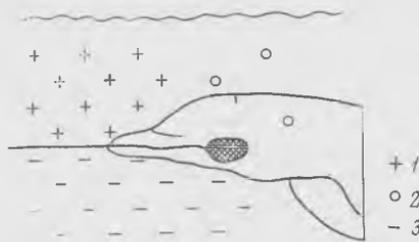


Рис. 93. Обнаружение дельфином рыбы перед головой и в различных местах (1—3)

может быть объяснена, во-первых, фокусирующим действием жировой подушки на лбу дельфина и, во-вторых, фокусирующим действием черепа. В связи с таким предположением нами была предпринята попытка экспериментального выяснения роли, которую играют череп и мягкие ткани головы белобочки в формировании диаграммы направленности излучения (Романенко, 1964; Романенко и др., 1965). Был поставлен эксперимент, в котором искусственный источник звука, моделировавший излучатель дельфина, помещали в отрезанную голову дельфина в области расположения воздушных мешков. Схема эксперимента подробно описана в главе VI (стр. 134) в связи с вопросом о физическом моделировании. Здесь же мы рассмотрим полученные результаты.

Результаты измерений представлены на рис. 94. Легко заметить, что диаграммы направленности, обусловленные целой головой дельфина (череп с мягкими тканями) на частотах 80 кГц и выше, примерно в два раза уже диаграмм направленности, обусловленных лишь одним черепом. Можно сделать вывод, что мягкие ткани головы дельфина (жировая подушка и пр.) играют некоторую положительную роль в сужении диаграмм направленности на высоких частотах, хотя основную роль в формировании направленности играет череп.

Следует отметить, что представленные на рис. 94 диаграммы направленности не следует отождествлять с диаграммами направленности звуков живого дельфина, так как излучатель звука, использовавшийся в модельном эксперименте, существенно отличается от естественных источников звука дельфинов. Представленные результаты позволяют лишь качественно оценить способность дельфина к направленному излучению звуков. Тем не ме-

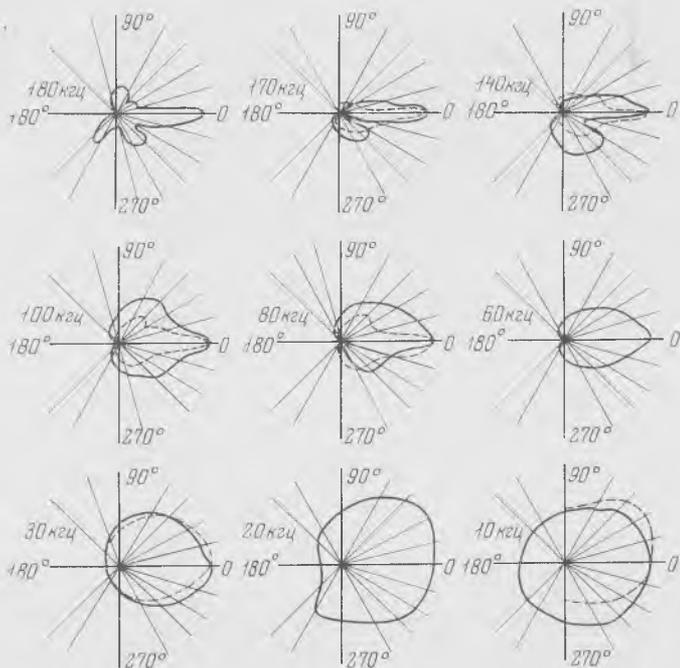


Рис. 94. Диаграммы направленности, формируемые черепом дельфина без мягких тканей (1) и с мягкими тканями (2) (в модельном эксперименте)

нее приведенные результаты качественно согласуются с полученными позднее данными Норриса и Эванса (Norris, Evans, 1967), которые изучали диаграммы направленности излучения эхолокационных сигналов у длинномордого дельфина.

3. Блокирование слуха дельфина от его собственных интенсивных сигналов

Исследования последних лет показали, что дельфины способны излучать весьма интенсивные звуки. Расчеты (Романенко, 1964) и измерения (Голубков и др., 1972) показывают, что интенсивность эхолокационных импульсов дельфина может составлять величину порядка 10^{-4} — 10^{-3} вт/см². Очевидно, что орган слуха дельфина должен быть как-то защищен от перегрузки его собственным интенсивным сигналом. Защита слуха может осуществляться, по-видимому, двумя способами: заглублением чувствительности слуха и экранировкой органов слуха от собственных эхолокационных импульсов. Первое предположение проверить трудно, а второе — сравнительно легко. Для этого необходимо измерить уровень звука в окрестности слуховых органов и срав-

нить с уровнем того же звука в области локационного аппарата. Именно такой эксперимент был проведен на афалине. Регистрацию звука на голове дельфина осуществляли с помощью миниатюрных гидрофонов и трехканального магнитофона, закрепляемого на спинном плавнике дельфина. Звуки регистрировали в полосе частот 100 гц — 120 кгц.

Схема расположения гидрофонов на голове дельфина показана на рис. 95. Гидрофон № 1, представляющий собой сферу из керамики ЦТС диаметром 20 мм и чувствительностью около 4 мкв/бар,

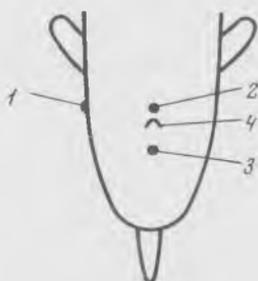


Рис. 95. Расположение гидрофонов на голове дельфина

1 — гидрофон № 1; 2 — гидрофон № 2; 3 — гидрофон № 3;
4 — дыхало

был закреплен в непосредственной близости от правого наружного слухового прохода. Гидрофон № 2 был закреплен сразу же за дыхалом с целью регистрировать звук на участке между дыхалом и черепом дельфина. Гидрофон № 3 был закреплен перед дыхалом на расстоянии 5 см от него. Оба гидрофона № 2 и 3 выполнены в виде цилиндров из керамики ЦТС. Их чувствительность не превышает 0,1 мкв/бар. (Более подробно устройство таких гидрофонов описано в главе II.)

В результате измерений установлено, что гидрофон № 3 регистрирует эхолокационные импульсы и свисты, гидрофоны № 2 и 1 регистрируют очень слабо только свисты (ослабление свистовых сигналов около 20 дб). Эхолокационные импульсы гидрофонами № 2 и 1 практически не прослушиваются, что свидетельствует об их ослаблении не менее чем на 40 дб. Ослабление импульсов можно объяснить только их экранировкой черепом и системой надчерепных воздухоносных дыхательных путей.

На рис. 96 показана фотография слеска надчерепных воздухоносных путей, закрепленного на черепе в том положении, в каком воздухоносные пути расположены у дельфина. Легко заметить, что череп вместе с воздухоносными путями составляет надежный экран, препятствующий распространению звука в сторону слуховых органов.

Отсутствие эхолокационных импульсов на участке между дыхалом и черепом ставит под сомнение гипотезу об излучении их трубчатыми воздушными мешками, так как они некоторой своей частью заходят в промежуток между дыхалом и черепом. Если бы участки трубчатых мешков, заходящие за дыхало, принимали

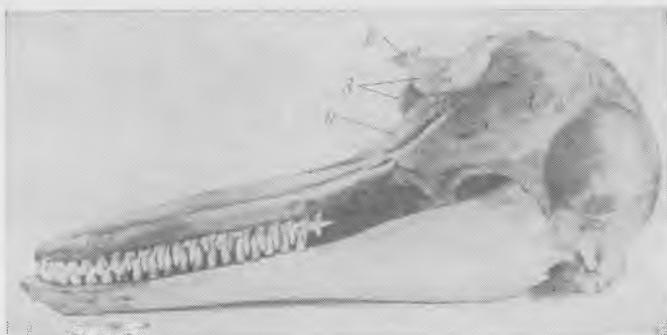


Рис. 96. Расположение надчерепных воздухоносных путей афалины
 1 — череп; 2 — дыхало; 3 — вестибулярные мешки; 4 — премаксиллярные мешки

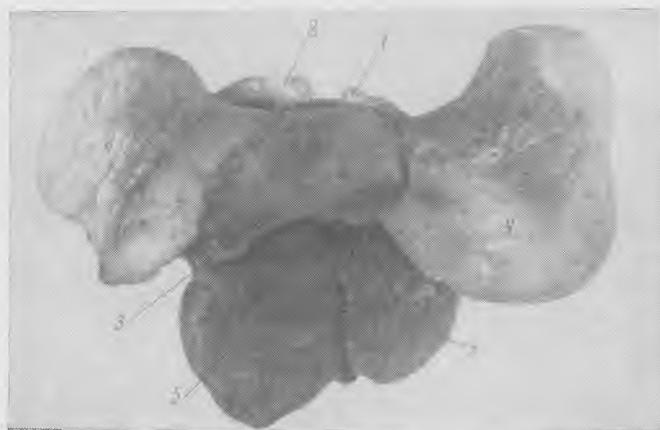


Рис. 97. Слепки трубчатых мешков (а) и всей системы надчерепных воздухоносных путей (вид сверху) (б)
 1 — левый трубчатый мешок; 2 — правый трубчатый мешок; 3 — дыхало; 4 — вестибулярные мешки; 5 — премаксиллярные мешки

участие в генерации эхолокационных импульсов, то гидрофон № 2 должен был бы эти импульсы зарегистрировать.

На рис. 97 показаны отдельно фотографии слепков трубчатых мешков и всей системы надчерепных воздухоносных дыхательных путей.

4. Сравнение гидролокатора дельфина с техническими гидролокационными системами

В настоящее время уже есть возможность сравнить основные характеристики сонара дельфина с соответствующими характеристиками технических сонаров. Однако прежде чем перейти непосредственно к сравнению систем, кратко изложим существующие методы оценки качества сонаров. Описываемые ниже методы оценки основаны на понятии «разрешающей ячейки» (Камп, 1972). Каждый сонар можно характеризовать числом разрешающих ячеек, представляющих собой секторы пространства, границы которых определяются разрешающей способностью сонара (φ) по углу. В этом случае разрешающие ячейки являются секторами по азимуту или пеленгу и имеют угловую ширину φ . Типичная диаграмма азимутальных разрешающих ячеек изображена на рис. 98,а. Ясно, что число разрешающих ячеек у сонара, производящего поиск в пределах 360° , равно

$$K_{\Pi} = \frac{360}{\varphi}. \quad (204)$$

Современные шумопеленгаторы обычно имеют от 20 до 50 разрешающих ячеек. Они могут различать акустические источники как множественные при условии, что источники разнесены по азимуту на величину, превосходящую разрешающую способность сонара. Несколько источников в пределах одной разрешающей ячейки будут казаться одним источником. При использовании подобного сонара необходимо принять по очереди сигналы из каждой разрешающей ячейки и тогда решить, есть ли в наличии какой-нибудь сигнал. Решение обычно принимает человек-оператор.

При работе с сонаром — шумопеленгатором можно использовать и другой метод. Например, к нему можно добавить сопряженный ряд полосных фильтров с шириной полосы пропускания B_1 , работающих в каждой разрешающей ячейке пеленгатора. Если B — вся ширина полосы, поступающей в систему сонара, то число спектральных разрешающих ячеек будет равно B/B_1 , а общее число разрешающих ячеек в спектральном анализаторе у пассивного сонара будет равно

$$K_{\Pi} = \frac{360}{\varphi} \cdot \frac{B}{B_1}. \quad (205)$$

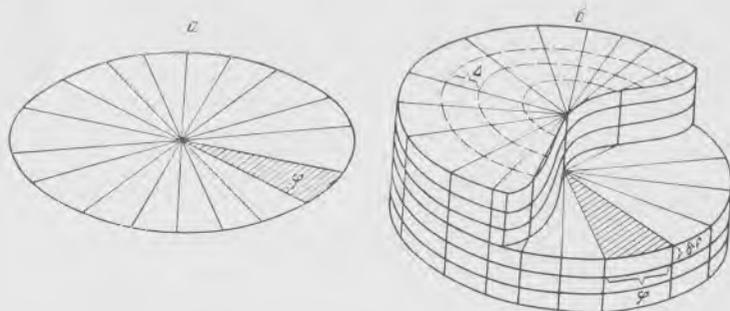


Рис. 98. Диаграмма азимутальных разрешающих ячеек гидролокатора (а) и разрешающих ячеек активного гидролокатора с разрешением по частоте, углу и дальности (б)

Такой сонар при работе мог бы иметь более 200 000 разрешающих ячеек. Работа сонара с такой схемой более сложна, чем работа по первой из описанных выше схем. Вместо того чтобы определить характеристики сигнала, скажем, в 50 разных ячейках, человеку-оператору, возможно, пришлось бы определять их в 200 000 разрешающих ячеек. В данном случае задача распознавания сигнала по спектру в значительной степени была бы возложена на сам сонар вместо оператора, т. е. сонар работал бы как автоматическое устройство. Делались многие попытки проектировать такие сонары, которые могли бы работать с минимальным участием оператора и функционировали бы так же хорошо, как и простой сонар, обязательной частью которого является человек-оператор. Однако практика показала, что у человека есть многосторонние способности по распознаванию особенностей рисунка на записывающих рекордерах и, если не учитывать утомление человека вследствие необходимости постоянной настороженности и сосредоточенного внимания к сигналам, появляющимся на рекордере или слышимым в наушниках, человек плюс относительно простой сонар может работать так же хорошо, как самое сложное автоматическое устройство.

К активным системам сонаров можно также применить понятие о наборе разрешающих ячеек. При этом активный сонар может проводить разрешение не только по азимуту и частоте, но и по дальности. Разрешающая способность по дальности характеризуется величиной Δ , представляющей собой разницу по дальности, эквивалентную длительности сигнала τ . Две цели, разделенные по дистанции менее чем на Δ , не будут наблюдаться отдельно. Структура разрешающих ячеек активного сонара показана на рис. 98, б. Вертикальные слои диаграммы представляют собой разрешение по частоте, а ряд concentрических окружностей, нанесенных симметрично вокруг центра диаграммы, образует границы ячеек, определяющие разрешение по расстоянию. Если R — максимальная дальность, на которой сонару предстоит работать, и сонар не имеет спектрального разрешения, то число раз-

решающих ячеек будет равно

$$K_a = \frac{360}{\Phi} \cdot \frac{R}{\Delta}. \quad (206)$$

У существующих сонаров K_a имеет величину 10 000 и больше. Если в сонаре введено спектральное разрешение, то количество ячеек будет равно

$$K_a = \frac{360}{\Phi} \cdot \frac{B}{B_1} \cdot \frac{R}{\Delta}. \quad (207)$$

Активные сонары со спектральным разрешением могли бы использовать больше 10^8 разрешающих ячеек.

В нашем случае целесообразно рассматривать сонары не отдельно от человека-оператора, а вместе с ним, так как нас интересуют их максимальные возможности, которые в значительной степени определяются участием человека-оператора.

Учитывая сказанное выше, можно принять, что современный сонар с участием человека-оператора можно характеризовать числом разрешающих ячеек порядка 10^5 , когда он работает в пассивном режиме, и 10^8 — в активном.

Теперь возвратимся к дельфинам. Известно, что в режиме шумопеленгации дельфин способен определять направление на источник шумового сигнала с полосой от 3 до 100 кгц с точностью не хуже 1—1,5° (Дьяченко и др., 1974). Эти данные относятся к дельфину белобочка. К сожалению, для белобочки нет данных по частотному разрешению. Но такие данные есть для азовки (Супин, Сухорученко, 1974), которая способна различать частоты, отличающиеся на 0,5%. Можно предполагать, что разрешающая способность по частоте у белобочки не хуже. В этом случае сонар дельфина можно характеризовать числом разрешающих ячеек порядка $3,6 \cdot 10^5$. Эта цифра получена по формуле (205), где величина B/B_1 принята равной 1500, исходя из указанной выше разрешающей способности дельфина по частоте.

Разрешающая способность по азимуту сонара афалины в активном режиме составляет величину порядка 1°, точнее в пределах 0,3—1,5° по данным Титова, Фадеевой (1974). Разрешающая способность того же дельфина по дальности равна 1 см при дальности локации 5 м (по данным тех же авторов). Если предположить разрешающую способность по частоте у афалины такой же, как у азовки, то можно вычислить количество разрешающих ячеек сонара афалины по формуле (207). Эта величина оказывается равной $2,7 \cdot 10^8$.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что сонар дельфина, по-видимому, не хуже существующих технических гидролокационных систем.

Существует еще один способ оценки сонара дельфина. Его предложил Гриффин (1964) для сравнительной оценки локаторов летучих мышей и радиолокаторов. Гриффин предложил прово-

дить сравнительную оценку по некоторому обобщенному параметру, представляющему собой комбинацию наиболее важных параметров локаторов и названному им «показателем эффективности» системы. Этот показатель имеет вид

$$A = \frac{R}{P \cdot W \cdot d^2}, \quad (208)$$

где R — дальность обнаружения (в см); d — диаметр лоцируемого объекта (в см); P — излучаемая мощность (в вт); W — вес локационной системы (в г); λ — длина звуковой волны (в см). Правильнее было бы использовать в выражении для показателя эффективности не диаметр лоцируемого объекта d , а диаметр эквивалентной сферы d_0 , создающей такой же эхо-сигнал, как лоцируемый объект. Дело в том, что не всегда $d = d_0$. В некоторых случаях (например, когда лоцируемым объектом является тонкая длинная проволока) $d_0 \gg d$, и тогда оценка эффективности системы по формуле, в которой использовано d вместо d_0 , будет неверной. Мы будем использовать выражение

$$A = \frac{R^4}{P \cdot W \cdot d_0^2}, \quad (209)$$

связывающее наиболее важные факторы, характеризующие систему.

Лучшей локационной системой является та, которая при меньшем собственном весе и меньшей энергии излучения способна обнаруживать цели меньших размеров на больших расстояниях. Другими словами, показатель эффективности тем больше, чем эффективнее локационная система. В приведенной формуле показатель степени у R , равный четырем, определяется тем, что энергия эхо-сигнала от лоцируемого объекта пропорциональна $1/R^4$. Показатель степени у d_0 , равный двум, определяется тем, что энергия эхо-сигнала от препятствий, размеры которых больше длины волны, пропорциональна d_0^2 .

Приведенное выражение для показателя эффективности может быть использовано также и для оценки локационной системы дельфина. При этом прежде всего необходимо определить порядки величин, входящих в показатель эффективности. Известно из последних работ (Дубровский и др., 1971), что афалина способна обнаруживать свинцовый шарик диаметром 8,5 мм с расстояния 11 м. Таким образом, можно принять, что $R = 1100$ см, $d_0 = 0,85$ см. Учитывая, что порог слышимости дельфина по интенсивности составляет порядок 10^{-17} – 10^{-18} вт/см² и что локационные сигналы излучаются направленно, легко показать, что дельфин должен излучать звук мощностью не менее 10^{-4} вт, чтобы эхо-сигнал от свинцового шарика диаметром 8,5 мм, находящегося на расстоянии 11 м от дельфина, имел интенсивность не менее 10^{-18} вт/см². Таким образом, принимаем, что $P = 10^{-4}$ вт. Под

локационной аппаратурой дельфина следует понимать органы и ткани, имеющие отношение к излучению и приему сигналов. К ним относятся дыхательные пути, легкие, череп, мягкие ткани головы, органы слуха и пр. Можно принять, что вес локационного аппарата дельфина составляет 5—10% от общего веса тела (как это определено для летучих мышей). При общем весе дельфина 100—200 кг это составляет около 10 кг. Таким образом, $W = 10^4$ г.

При этих данных численное значение показателя эффективности локационной системы дельфинов имеет порядок $10^{12} \div 10^{13}$. Для сравнения в табл. 10 приведены показатели эффективности для радиолокационной станции AN/APS-10, двух видов летучих мышей и дельфина.

Таблица 10

	Радиолокатор	Летучая мышь		Дельфин афалина
		большая рыжая	малая рыжая	
Обнаруженная цель	Самолет	Насекомое	Проволока диаметром $1,8 \cdot 10^{-2}$ см	Сфера
Диаметр эквивалентной сферы, см	300	1	1,8	0,85
Дальность обнаружения, см	$8 \cdot 10^6$	200	90	1100
Вес аппаратуры, г	$9 \cdot 10^4$	1,0	0,5	10^4
Излучаемая мощность, вт	10^4	10^{-5}	10^{-6}	10^{-4}
Показатель эффективности	$5,1 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{14}$	$4,1 \cdot 10^{13}$	$10^{12} - 10^{13}$

Учитывая приблизительный характер вычислений, можно сделать вывод, что и при таком способе сравнения локационная система дельфинов оказывается по эффективности одного порядка с локационными системами летучих мышей и некоторых типов радиолокаторов.

Описанные выше различные методы оценки эффективности локационных систем не являются совершенными. Методы, основанные на понятии «разрешающей ячейки», позволяют оценить лишь разрешающие способности локаторов, не учитывая их энергетики, веса, стоимости и т. п. Метод, предложенный Грифффином, учитывает энергетику, вес, но практически не учитывает разрешающих способностей. Открытым остается также вопрос об эквивалентности условий, в которых работают сравниваемые локационные системы. Естественно, что в таком случае можно говорить лишь о сравнении порядков величин, отражающих качество систем.

В связи со сказанным представляется интересным предложение Каптюга и Ольшевского (1973) определять эффективность локационных систем в следующем виде

$$\mathcal{E} = \frac{\sum_{k=1}^N a_k A_k}{\sum_{l=1}^M b_l B_l}, \quad (210)$$

где A_k — успешность решения k -й задачи; B_l — затраты ресурсов l -го типа; a_k и b_l — соответствующие весовые коэффициенты. Например, задачей № 1 ($k = 1$) может быть задача обнаружения цели при определенных условиях. Задача № 2 ($k = 2$) — определение координат цели, задача № 3 ($k = 3$) — классификация цели и т. п. В этом случае $A_1 = P_1$, $A_2 = P_2$, $A_3 = P_3$ — вероятности обнаружения, определения координат, классификации и т. п. Коэффициенты a_1 , a_2 и a_3 учитывают важность задачи и могут быть определены путем экспертных оценок по различным группам специалистов. Величины B_1 , B_2 и т. п. могут характеризовать габариты, мощность, стоимость системы. Коэффициенты b_1 , b_2 и т. п. должны при этом определяться тем же способом, что и a_1 , a_2 , . . .

Такой метод оценки при тщательном и удачном выборе коэффициентов может оказаться весьма перспективным. Однако применить его в настоящее время к сравнительной оценке локатора дельфина и технических систем пока не представляется возможным ввиду малочисленности данных.

5. Звуки рыб и механизмы их излучения

Исследования проводились на морских и пресноводных рыбах. Регистрацию звуков осуществляли в диапазоне частот от 50 до 10 000 гц. Полное описание звуков исследованных рыб дано в «Атласе звуков рыб» (Никольский и др., 1967), а также в других работах (Протасов, Романенко, 1961, 1962, Протасов и др., 1965). Подробный анализ сигнального значения звуков рыб и некоторых механизмов их излучения дан в монографии В. Р. Протасова (1965). Поэтому здесь мы не будем касаться указанных вопросов, а рассмотрим лишь некоторые особенности излучения звуков рыбами с помощью плавательного пузыря.

Значительная часть звуков излучается рыбами с помощью плавательного пузыря. Плавательный пузырь, представляющий собой воздушную полость той или иной конфигурации, возбуждается с помощью специальных мышц. При этом плавательный пузырь работает как резонатор. На рис. 99 показаны плавательные пузыри нескольких видов рыб. Видно, что форма пузыря может быть довольно причудливой. Однако форма, как известно (Вестон, 1970), практически не влияет на его резонансную частоту, а определяет в основном только его добротность. Резонансная же ча-

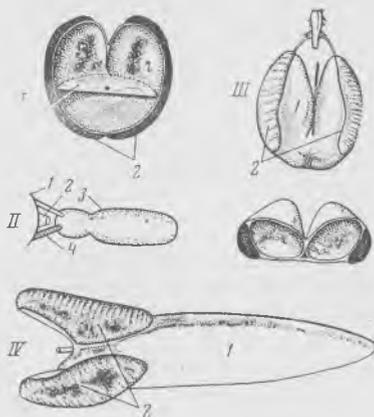


Рис. 99. Плавательные пузыри некоторых рыб

I — *Orsanus tau*: 1 — диафрагма с центральным отверстием, 2 — барабанные мускулы; II — *Thegaron th.* (схема): 1 — череп, 2 — первый позвонок, 3 — плавательный пузырь; 4 — мышцы; III — *Macrurus bergiax*: 1 — плавательный пузырь, 2 — барабанные мускулы; IV — *Porichthys notatus*: 1 — плавательный пузырь, 2 — барабанные мускулы

стота определяется его объемом. Если деформированный пузырь характеризовать радиусом R сферы эквивалентного объема, то частота основного резонанса может быть вычислена по формуле

$$f_0 = (2\pi R)^{-1} \left(\frac{3\gamma P_0}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (211)$$

где R — радиус пузыря; γ — отношение удельных теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении для воздуха; P_0 — гидростатическое давление и ρ — плотность жидкости. При выводе формулы (211) предполагалось, что пузырь колеблется как система с сосредоточенными параметрами (присоединенная масса воды и упругость воздуха в пузыре). При обычных размерах плавательного пузыря (единицы сантиметров) его резонансная частота лежит в диапазоне сотен герц, что неплохо согласуется с данными о звуках многих пузырьных рыб. Однако звуки некоторых пузырьных рыб содержат не только низкочастотные, но и высокочастотные компоненты, которые трудно объяснить описанными резонансными свойствами пузыря. Обычно высокочастотные компоненты лежат в диапазоне частот 3—6 кгц, а формула (211) может объяснить появление подъемов в спектре частот в диапазоне в лучшем случае сотен герц. Иногда высокочастотные компоненты объявляют гармониками, но это едва ли верно. В качестве примера на рис. 100 приведена сонограмма свиста белуги, а на рис. 101 — сонограмма ее же импульсных сигналов. Видно, что в обоих случаях максимум энергии излучения лежит на частоте около 4 кгц. Иногда белуга издает сравнительно низкочастотные свисты (рис. 102), основная частота которых близка к 1 кгц.

Наличие высокочастотных компонент в спектрах звуков рыб можно объяснить, если вспомнить, что воздушную полость в воде можно рассматривать не только как систему с сосредоточенными параметрами, но и как систему с распределенными параметрами, т. е. необходимо учесть резонансные колебания воздушного объе-



Рис. 100. Высокочастотный свист белуги

По оси ординат — отметки 6, 12.

ма внутри пузыря, как в жестких границах. На стр. 150 — 152 рассмотрен вопрос о собственных колебаниях сферического и цилиндрического воздушных объемов, помещенных в воду или водоподобную среду. Пользуясь выведенными соотношениями, можно оценить, каким должен быть размер плавательного пузыря белуги, чтобы его высокочастотный резонанс был на частоте 4 кГц. При этом необходимо учитывать, что плавательный пузырь белуги имеет форму, близкую к цилиндрической. Следо-

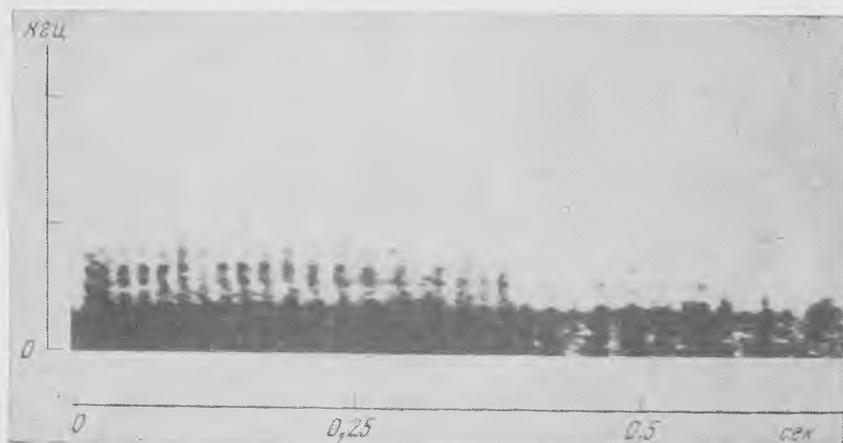


Рис. 101. Импульсный звук белуги

По оси ординат — отметки 12, 24

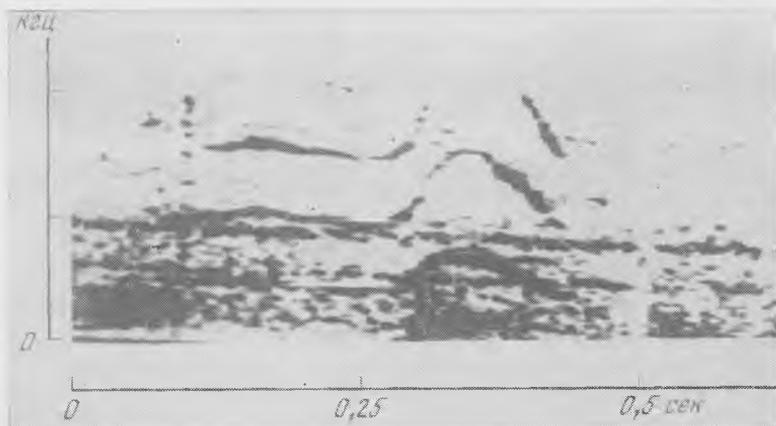


Рис. 102. Низкочастотный свист белуги

По оси ординат — отметки 2, 4

вательно, мы должны воспользоваться соотношениями (199—203). Вероятнее всего, что свистовой и импульсный сигналы с резонансом на 4 кгц излучаются в результате радиальных колебаний плавательного пузыря. Об этом свидетельствует соотношение обертонов и основного тона, которое с точностью 2% совпадает с рассчитанным по формулам (199) и (200). Вычисления показывают, что радиус цилиндрического плавательного пузыря белуги должен иметь величину около 2,4 см. Свистовой сигнал с резонансом на частоте 1 кгц излучается, вероятнее всего, в результате продольных колебаний воздуха в плавательном пузыре. Об этом свидетельствует соотношение обертонов, которое представляет собой гармонический ряд. Оценка показывает, что при этом длина плавательного пузыря должна быть около 17—20 см. (Размер экземпляра белуги, звуки которой приведены на рисунках, около 80 см.) Для рыб, у которых плавательный пузырь имеет форму, близкую к сферической, аналогичные оценки можно производить, пользуясь соотношениями (193—196).

В заключение настоящего параграфа стоит сказать несколько слов о некоторых особенностях регистрации звуков рыб в связи с их электрическими свойствами. В последние годы широкое развитие получили исследования электрических свойств рыб. При этом обнаружено (Протасов, 1972), что импульсам электролокации, как правило, сопутствуют акустические импульсы. Форма и спектры электрических и акустических импульсов могут существенно отличаться друг от друга, в то время как отдельный прием этих импульсов представляет трудную задачу. Это обстоятельство нужно иметь в виду при изучении биоакустики рыб. Не исключено, что в том обширном фактическом материале, который уже накопил-

ся в мировой литературе по звукам рыб, значительную долю составляют сведения об электрических сигналах рыб, принимавшихся за акустические. О необходимости внимательного анализа регистрируемых акустических сигналов рыб именно с точки зрения учета возможности одновременной записи и электрических сигналов постоянно напоминает В. Р. Протасов, один из крупнейших исследователей биоакустики и электрических свойств рыб. В частности, и эти строки написаны под влиянием многократных личных бесед с ним.

Укажем некоторые меры, которые необходимо принимать в тех случаях, когда есть опасность одновременной регистрации с помощью гидрофона акустических и электрических сигналов рыб. Прежде всего, это тщательная электрическая экранировка гидрофона и регистрирующей аппаратуры. Однако такая мера не всегда может быть эффективной (в частности, при слабых акустических и сильных электрических излучениях). В таком случае можно рекомендовать прием сигналов рыб одновременно на два приемника — акустический и электрический, максимально удаленные от источника сигналов. Это позволит, во-первых, разделить по времени акустический и электрический сигналы и, во-вторых, сравнить по форме и спектру сигналы, принятые гидрофоном и электроприемником. Такое сравнение позволит сделать вывод о существовании одновременно акустического и электрического сигналов или только одного из них.

Приложение

До недавнего времени в акустической и биоакустической литературе использовалась, как правило, система единиц измерения СГС.

В связи с переходом к Международной системе единиц измерения СИ предпочтительно использовать эту систему.

В таблице, приведенной ниже, даны встречающиеся при проведении биоакустических измерений единицы в системе СГС, СИ и их соотношения.

Таблица единиц измерения основных акустических величин в системе СГС и международной системе СИ

Наименование величин	Единица измерения	Сокращенное обозначение	Единица измерения	Сокращенное обозначение	Соотношение между единицами СИ и СГС
	Система СГС			Система СИ	
Смещение	сантиметр	см	метр	м	$1 \text{ м} = 100 \text{ см}$
Скорость линейная	сантиметр в секунду	см/сек	метр в секунду	м/сек	$1 \text{ м/сек} = 100 \text{ см/сек}$
Ускорение линейное	сантиметр в секунду в квадрате	см/сек ²	метр в секунду в квадрате	м/сек	$1 \text{ м/сек}^2 = 100 \text{ см/сек}^2$
Давление	дина на сантиметр в квадрате	бар *	ньютон на метр в квадрате	н/м ²	$1 \text{ н/м}^2 = 10 \text{ бар}$
Сила	грамм сантиметр на секунду в квадрате	дина	ньютон	н	$1 \text{ н} = 10^5 \text{ дин}$
Энергия	сантиметр в квадрате грамм в секунду в квадрате	см ² ·г/сек (эрг)	джоуль	дж	$1 \text{ дж} = 10^7 \text{ эрг}$
Мощность	эрг в секунду	эрг/сек	ватт	вт	$1 \text{ вт} = 10^7 \text{ эрг/сек}$
Интенсивность	эрг на квадратный сантиметр в секунду	эрг/см ² ·сек	ватт на квадратный метр	вт/м ²	$1 \text{ вт/м}^2 = 10^3 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$
Частота	герц	гц	герц	гц	$1 \text{ гц} = 1 \text{ гц}$
Удельное акустическое сопротивление	дин·секунда на кубический сантиметр	дин·сек/см ³	ньютон·секунда на кубический метр	н·сек/м ³	$1 \text{ н} \cdot \text{сек/м}^3 = 10^{-1} \text{ дин} \cdot \text{сек/см}^3$
Пьезоэлектрический модуль	сантиметр на вольт	см/в	кулон на ньютон или метр на вольт	к/н или м/в	$1 \text{ к/н} = 3 \cdot 10^4 \text{ см/в}$

* В отечественной литературе баром называют величину, равную 1 дин/см². В зарубежной литературе баром считается величина, равная 1 атм, т. е. 10⁶ дин/см². Величина, равная 1 дин/см², в зарубежной литературе называется микробаром (мкбар).

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов А. П., Голубков А. Г., Королев В. И., Фрадкин В. Б. 1971. О помехозащищенности гидролокатора дельфина.— Труды Акустического ин-та, вып. 17.
- Агарков Г. Б., Солуха Б. В., Хоменко Б. Г. 1971. О гидролокационной способности дельфинов.— Бионика, 5.
- Айрапетьянц Э. Ш., Константинов А. И. 1970. Эхолокация в природе. Л., «Наука».
- Алексеева Т. В., Голубков А. Г., Ершова И. В. 1971. К вопросу об активной ширине спектра локационных сигналов дельфинов.— Труды Акустического ин-та, вып. 17.
- Ананьева А. А. 1963. Керамические приемники звука. М., «Наука».
- Андреева И. Б. 1964. О рассеянии звука газовыми пузырями рыб в глубоководных звукорассеивающих слоях океана.— Акустический журн., т. 10, вып. 1.
- Архангельский М. Е., Афанасьев В. Я. 1957. Исследование фотодиффузионного метода визуализации ультразвуковых полей.— Акустический журн., т. 3, вып. 3.
- Бабкин В. П., Дубровский Н. А. 1971. О дальности действия и помехоустойчивости эхолокационного аппарата дельфина афалины при обнаружении различных мишеней.— Труды Акустического ин-та, вып. 17.
- Бендат Д., Пирсол А. 1971. Измерение и анализ случайных процессов. М., «Мир».
- Брежневский Л. М. 1957. Волны в слоистых средах. М., «Наука».
- Бугулавская С. И., Романенко Е. В., Холод Л. И. 1971. Использование пьезоэлектрического эффекта в акустических измерениях.— Акустический журн., т. 17, вып. 2.
- Ван-Бергейк В. 1969. Направленный и ненаправленный слух у рыб. В кн.: «Морская биоакустика». Л., «Судостроение».
- Вестон Д. 1970. Распространение звука в присутствии пузырных рыб. В кн. «Подводная акустика». Под ред. В. М. Альберса. М., «Мир».
- Геллер Е. С. 1971. Краткие сведения из общей теории связи и теории информации. В кн. «Биологическая телеметрия». М., «Медицина».
- Гиро Л. Р., Дубровский Н. А. 1973. О происхождении низкочастотной компоненты эхолокационного импульса дельфина. 8-я Всес. Акустическая конф. М.
- Голеньков А. Н., Павлов Л. Е. 1967. Абсолютная градуировка измерительных гидрофонов в диапазоне звуковых частот.— Измерительная техника, 5.
- Голубков А. Г., Ершова И. В., Королев В. И., Малышев Ю. А. 1972. Об энергетических параметрах локационного аппарата черноморских афалин.— Труды Ленингр. ин-та авиац. приборостроения, вып. 76.
- Гриффин Д. Р. 1961. Эхо в жизни людей и животных. М., ГИФМЛ.
- Дубровский Н. А., Титов А. А., Краснов П. С., Бабкин В. П., Лекомцев В. М., Никуленко Г. В. 1970. Исследование разрешающей способности эхолокационного аппарата черноморской афалины.— Труды Акустического ин-та, вып. 10.

- Дубровский Н. А., Краснов П. С. 1971. Распознавание дельфином афалиной упругих шаров по материалу и размеру.— Труды Акустического ин-та, вып. 17.
- Дьяченко С. М., Королев Л. Д., Резвов Р. Н., Чемоданов Б. К. 1971. Исследование способности дельфина афалины определять направление на источник шумового сигнала.— Труды Акустического ин-та, вып. 17.
- Зайдель А. Н. 1967. Элементарные оценки ошибок измерений.
- Заславский Г. Л. 1974. О направленности звукоизлучения у черноморского дельфина афалины.— Труды Акустического ин-та, вып. 17. Л., «Наука».
- Зверев В. А. 1956. О возможности абсолютной калибровки излучателей и приемников звука по давлению радиации без использования радиометра.— Акустический журн., т. 2. вып. 4.
- Златоустова Л. В., Низова А. Б. 1971. Опыт акустического анализа некоторых свистов афалины (*Tursiops truncatus* Mont.). В сб. «Морфология и экология морских млекопитающих». М., «Наука».
- Ивенси У., Сэверленд У. 1965. Возможности использования телеметрии при изучении сигнализации морских животных. В сб. «Биотелеметрия». М., «Мир».
- Каптюк А. А., Ольшевский В. В. 1973. О простом показателе эффективности многофункциональных статистических измерительных систем, 6-й Всес. симпозиум «Методы представления и аппаратный анализ случайных процессов и полей». Тез. докл. М.
- Клюкин И. И., Колесникова А. Е. 1968. Акустические измерения в судостроении. Л., «Судостроение».
- Котюк А. Ф., Ольшевский В. В., Цветков Э. И. 1967. Методы и аппаратура для анализа характеристик случайных процессов. М., «Энергия».
- Лебедева Л. П. 1965. Измерение динамического комплексного модуля сдвига тканей животных.— Акустический журн., т. 11, вып. 2.
- Лэмб Г. 1960. Динамическая теория звука. М., Физматгиз.
- Марков В. И., Островская В. М. 1973. Анализ возможных способов кодирования информации в коммуникативных сигналах дельфинов. 8-я Всес. Акустическая конф.
- Мирский Г. Я. 1972. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М., «Энергия».
- Морз Ф. 1949. Колебания и звук. М., ГИТТЛ.
- Мотулевич Г. П., Фабелинский И. Л., Штейнгауз Л. Н. 1950. Абсолютный акустический микрорадиометр.— Докл. АН СССР, т. 70, № 1.
- Мясников Л. Л. 1937. Акустические измерения. М., ОНТИ НКТП СССР.
- Наугольных К. А. 1959. Некоторые вопросы теории распространения звуковых волн конечной амплитуды. Канд. дисс. М., Акустич. ин-т.
- Никольский И. Д., Протасов В. Р., Романенко Е. В., Шишкова Е. В. 1967. Звуки рыб. Атлас. М., «Наука».
- Новиков А. А., Новицкий М. А. 1968. Измерительные электрохимические и электрокинетические акустические преобразователи. — 6-я Всес. Акустическая конф. М.
- Протасов В. Р. 1965. Биоакустика рыб. М., «Наука».
- Протасов В. Р. 1972. Биоэлектрические поля в жизни рыб. М., «Наука».
- Протасов В. Р., Романенко Е. В. 1961. О характере звуков, издаваемых некоторыми рыбами Черного моря.— Докл. АН СССР, т. 139, № 3.
- Протасов В. Р., Романенко Е. В. 1962. Звуки, издаваемые некоторыми рыбами, и их сигнальное значение.— Зоол. журн., т. 41, вып. 10.
- Протасов В. Р., Романенко Е. В., Подлипалин Ю. Д. 1965. О биологическом значении звуков некоторых рыб.— Вопросы ихтиол., т. 5, вып. 3/36.
- Пустьвалова Т. А. 1968. Исследование методов градуировки электроакустических преобразователей в воздухе в ультразвуковом диапазоне частот.— 6-я Всес. Акустическая конф. М.
- Резников А. Е. 1970. О звуковидении у дельфинов. Тез. докл. 23 научно-техн. конф. Ленингр. ин-т авиац. приборостроения (ЛИАП). Л.
- Рой Н. А., Фролов Д. П. 1961. Установака для калибровки широкополос-

- ных приемников давления. Передовой научно-технический и производственный опыт (ПНТПО), тема 36, № П—61—7/2.
- Романенко Е. В. 1957. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. Акустический журн., т. 3, вып. 4.
- Романенко Е. В. 1958. Экспериментальное исследование распространения волн конечной амплитуды. 4-я Всес. Акустическая конф. Реф. докл. М.
- Романенко Е. В., Рой Н. А. 1958. Широкополосные ультразвуковые приемники. ПНТПО, тема 38, № П—58—169/6.
- Романенко Е. В. 1959а. Экспериментальное исследование распространения сферических волн конечной амплитуды.— Акустический журн., т. 5, вып. 1.
- Романенко Е. В. 1959б. Приборы для измерения акустических величин. Реферативный сборник. ПНТПО, тема 38, № П—59—141/7.
- Романенко Е. В. 1959в. Способ определения частотных и фазовых характеристик приемников ультразвука. Изобретение. Авт. свид. № 119025.
- Романенко Е. В. 1959г. Сферический приемник ультразвука. Изобретение. Авт. свид. № 119026.
- Романенко Е. В. 1960а. Конструкция и применение миниатюрных приемников ультразвука. Техн.-информ. бюлл. Центрального конструкторского бюро электротехнического оборудования № 1 (13).
- Романенко Е. В. 1960б. Установка для калибровки гидрофонов. ПНТПО, тема 34, № П—60—50/5.
- Романенко Е. В. 1961. О ширине фронта пилообразных волн.— Акустический журн., т. 7, вып. 1.
- Романенко Е. В. 1962. Экспериментальное исследование распространения волн конечной амплитуды в жидкостях. Канд. дисс. Акустич. ин-т. М.
- Романенко Е. В., Протасов В. Р. 1962. О звуках белуги.— Природа, № 6.
- Романенко Е. В., Наугольных К. А. 1963. Способ градуирования акустических приемников. Изобретение. Авт. свид. № 157619.
- Романенко Е. В. 1964. О гидролокационной способности дельфинов.— Акустический журн., т. 10, вып. 4.
- Романенко Е. В., Томилин А. Г., Артеменко Б. А. 1965. К вопросу о звукообразовании и направленности звуков у дельфинов. В сб. «Бионика». М., «Наука».
- Романенко Е. В. 1967. Приемники ультразвука и методы их градуировки. В кн. «Источники мощного ультразвука». М., «Наука».
- Романенко Е. В., Бугулавская С. Н. 1968. О термодинамической и волновой поправках в методе пистонфона.— 6-я Всес. Акустическая конф. М.
- Романенко Е. В. 1972а. Приемный преобразователь ультразвуковых колебаний. Изобретение. Авт. свид. № 342308.
- Романенко Е. В. 1972б. Ближнее акустическое поле дельфина афалины. 5-е Всес. совещ. по биологии морских млекопитающих. Махачкала.
- Романенко Е. В. 1973а. Об излучении вистовых сигналов дельфином. 4-я Всес. конф. по бионике. Тез. докл. М.
- Романенко Е. В. 1973б. О механизме излучения и формирования эхолокационных сигналов афалиной.— 8-я Всес. Акустическая конф. М.
- Романенко Е. В., Чикалкин В. А. 1974. Магнитофон для подводной записи. В сб. «Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих». М., «Наука».
- Романенко Е. В., Янов В. Г., Акопян А. И. 1974. Методика исследования эхолокационного аппарата дельфина с помощью радиотелеметрической системы. В сб. «Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих». М., «Наука».
- Рэйли. 1955. Теория звука, т. 2. М., ГИТТЛ.
- Супин А. Я., Сухорученко М. Н. 1974. Характеристики акустического анализатора дельфина. В сб. «Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих». М., «Наука».
- Терешин Г. М. 1968. Радиоизмерения. М., «Энергия».
- Тетельбаум И. М. 1959. Электрическое моделирование. М., Физматгиз.

- Титов А. А., Фадеева Л. М. 1971. О пространственной разрешающей способности эхолокатора дельфина.— Труды Акустического ин-та, вып. 17.
- Тихонов А. Н., Самарский А. А., 1953. Уравнения математической физики. М., ГИТТЛ.
- Харкевич А. А. 1962. Спектры и анализ. М., ГИФМЛ.
- Холтер Н. 1965. Некоторые замечания о применении телеметрии в биологии. В сб. «Биотелеметрия». М., «Мир».
- Черный А. Г. 1972. Функциональные характеристики периферических отделов слуховой системы ушастой совы. Канд. дисс. М., МГУ.
- Шкурин Г. П. 1964. Справочник по новым электроизмерительным приборам. М., Воениздат.
- Шнейдер Г. 1962. Новые данные о звукообразовании у рыб.— Зоол. журн., т. 41, № 11.
- Шофилд Д. 1965. Преобразователи. В сб. «Подводная акустика». Под ред. В. М. Альберса. М., «Мир».
- Яблоков А. В., Белькович В. М., Борисов В. И. 1972. Киты и дельфины. М., «Наука».
- Янов В. Г., Романенко Е. В. 1972. Радиотелеметрическая система для измерения гидродинамических параметров дельфинов в условиях ограниченной акватории.— В сб. «Бионика», № 6. Киев, «Наукова думка».
- Altes R. A. 1971. Computer derivation of some dolphin echolocation signals.— Science, v. 173.
- Backus R. H., Schevill W. E. 1966. Physeter clicks. In: Whales, dolphins and porpoises. Berkeley — Los Angeles, Univ. Calif. Press.
- Baldwin M. A. 1965. Some experiments in marine biotelemetry.— Naval Res. Revs., v. 18, 2.
- Batteau D. W. 1967. Theories of sonar systems and their application to biological organisms.— In: Animal sonar systems. Biology and Bionics, v. 2. Busnel R. G. (Ed.). INRA—CNRZ.
- Blair W. F. 1963. Acoustic behaviour of amphibia. In: Acoustic Behaviour of Animals. Busnel R. G. (Ed.). Amsterdam — London — N. Y.
- Busnel R. G., Dziedzic A. 1966a. Acoustic signals of the pilot whale *Globicephala melaena* and of the porpoises *Delphinus delphis* and *Phocoena phocoena*.— In: Whales, dolphins and porpoises. Univ. Calif. Press.
- Busnel R. G., Dziedzic A. 1966b. Acoustique physiologie — caractéristiques physiques de certains signaux acoustiques du Delphinide *Steno bredansis* Zesser. — C. r. Acad. sci., т. 262.
- Busnel R. G., Dziedzic A. 1966c. Résultats métrologiques expérimentaux de l'écholocation chez le phocoena phocoena et leur comparaison avec ceux de certaines chauves — souris. — In: Animal sonar systems. Biology and Bionics, v. 1. Busnel R. G. (Ed.). INRA — CNRZ.
- Caldwell D. K., Caldwell M. C. 1965. Individualized whistle contours in bottle-nosed dolphins. (*Tursiops truncatus*).— Nature, v. 207, 4995.
- Claude S. 1960. Babble transducer for radiating high-power low-frequency sound in water.— JASA, v. 32, 10.
- Collins J. L., Riche W. C., Engoish G. E. 1963. Solion infrasonic microphone. Proc. 66 Weet. ASA.— JASA, v 35, 11. (Ed.). N. Y., Plenum Press.
- De Rosa L. A., Vallesse L. M. 1966. Neuron model interpretation of impulsive auditory response. Bionics Sympos. 3—5 May, Wright—Patterson Air Force Base, Ohio.
- Diercks K. J., Trochta R. T., Greenlaw C. F., Evans W. E. 1971. Recording and analysis of dolphin echolocation signals.— JASA, v. 49, 6, part 1.
- Dreher J. J. 1969. Acoustic holography of Cetacean echo-location. In «Acoustical holography», v. 1 L. Lamore (Ed.). N. Y. Plenum Press.
- Dreher J. J., Evans W. E. 1964. Cetacean communication.— In: Marine Bio-acoustics. W. N. Tavolga (Ed.) Pergamon Press.
- Dumortier B. 1963. The physical characteristics of sound emissions in Arthropoda. In: Acoustic behavior of animals. Busnel R. G. (Ed.). Amsterdam — London — N. Y.
- Evans W. E., Prescott J. H. 1962. Observation of the sound production capa-

- bilities of the bottlenose porpoise: A study of whistles and clicks.— *Zoologica*, v. 47, 3.
- Fay R. D. 1931. Plane sound waves of finite amplitude.— *JASA*, v. 3, 2.
- Fisch M. P., Mowbray W. H. 1962. Production of underwater sound by the white whale or beluga, *Delfinopterus leucas* (Pallas).— *J. Mar. Res.*, v. 20, 2.
- Frisch K., Stetter H. 1932. Untersuchungen über den Sitz des Gehörsinnes bei der Elirtze.— *Z. vergl. Physiol.*, 17.
- Gould J., Morgan C. T. 1941. Hearing in the rat at high frequencies.— *Science*, v. 94.
- Gould E. N., Negus C., Novick A. 1964. Evidence for echolocation in shrews.— *J. Exper. Zool.*, v. 156, 1.
- Griffiths J. W. R. 1967. Theories of sonar system in relation to biological organisms.— In: *Animal sonar systems. Biology and Bionics*, v. 2 R. G. Busnel (Ed.). INRA — CNRZ.
- Griffin D. R. 1953. Rat sounds under natural conditions with evidence for the echolocation of insect prey.— *J. Exper. Zool.*, v. 123.
- Harrison T. 1966. Onset of echolocation in *Collalalia swiftlets*.— *Nature*, v. 212, 5061.
- Hedegaard P. 1968. The free field calibration of a sound level meter.— 6-th Internat. Congr. on Acoustics, Tokyo, 21—28 August.
- Kellog W. N., Kohler R., Morris H. N. 1953. Porpoise sounds as sonar signals.— *Science*, v. 117.
- Kellog W. N. 1961. *Porpoises and sonar*. Univ. Chicago Press.
- Larkam C. W. 1966. Solion acoustic-type fluid-current meter.— *JASA*, v. 39, 2.
- Lilly J. C. 1962. Vocal behaviour of the bottlnose dolphin.— *Proc. Amer. Philos. Soc.*, v. 106, 6.
- Lilly J. C. 1963. Distress call of the bottlnose dolphin: stimuli and evoked behavioral responses.— *Science*, v. 139, 3550.
- Lilly J. C. 1966. Sonic-ultrasonic emissions of the bottlnose dolphin.— In: *Whales, dolphins and porpoises*. Univ. Calif. Press.
- Lilly J. C., Miller A. M. 1961a. Sounds emitted by the bottlnose dolphin.— *Science*, v. 133, 3465.
- Lilly J. C., Miller A. M. 1961b. Vocal exchanges between dolphins.— *Science*, v. 134, 3493.
- Maniva V. 1960. Detection of fish by soundbo.— *Bull. Japan Soc. Sci. Fisheries*, v. 26, 3.
- McBride A. F. 1956. Evidence for echolocation by cetaceans.— *Deep — Sea Res.*, v. 3.
- Medway L. 1959. Echo-evocation among *Collocalia*.— *Nature*, v. 184.
- Norris K. S., Prescott J. H., Asa Dorian P. V., Perkins P. 1961. An experimental demonstration of echolocation behaviour in the porpoise, *Tursiops truncatus* (Montegu).— *Biol. Bull.*, v. 120, 2.
- Norris K. S. 1963. Some problems of echolocations in cetaceans.— In: *Marine Bio-acoustics*. N. Y., Pergamon Press.
- Norris K. S., Evans W. E. 1967. Directionality of echolocation click in the rough-tooth porpoise *Steno bredanensis* (Lesson).— In: *Marine Bio-acoustics*. N. Y., Pergamon Press.
- Norris K. S., Evans W. E., Turner R. N. 1966. Echolocation in an Atlantic bottlnose porpoise during discrimination.— In: *Animal sonar systems. Biology and Bionics*, v. 1. G. Busnel (Ed.). INRA — CNRZ.
- Novick A. 1959. Acoustic orientation in the cave swiftlet.— *Biol. Bull.*, v. 117, 3.
- Poulter T. C. 1963a. The sonar of the sea lion.— *IEEE Trans. Ultrasonic Eng.*, v. 10.
- Poulter T. C. 1963b. Sonar signals of the sea lion.— *Science*, v. 139.
- Raymond F. W. 1963. Nonacoustical method for measuring sensitivity of a piezoelectric hydrophone.— *JASA*, v. 35, 1.
- Riley D. A., Rosenzweig M. 1957. Echolocation in rats.— *J. Compar. Physiol. and Psychol.*, v. 50.

- Roeder K. D., Treat A. E. 1957. Ultrasonic reception by the tympanic organ of noctuid moths.— J. Exper. Zool., v. 134.
- Rosenzweig M. R., Riley D. A., Krech K. 1955. Evidence for echolocation in the rat.— Science, v. 121.
- Schaver H. N., Poulter T. C. 1967. Sea lion echo ranging.— JASA, v. 42, 2.
- Schevill W. E., Lawrence B. 1956. Food-finding by a captive porpoise (*Tursiops truncatus*).— Breviora, Mus. Comp. Zool., Harvard. v. 52.
- Schevill W. E., Watkins W. A., Ray C. 1963. Underwater sounds of Pinnipeds.— Science, v. 141.
- Schleidt W. M. 1951. Töne hoher Frequenz bei Mäusen *Experientia*, 7.
- Schleidt W. M. 1952. Reaktionen aus Töne hoher Frequenz bei Nagern.— *Naturwissenschaften*, Bd. 39.
- Schloss F., Strassberg M. 1962. Hydrophone calibration in a vibrating column of liquid.— JASA, v. 34, 7.
- Shannon C. E. 1958. The mathematical theory of communication.— *Bell System Techn. J.*, v. 27.
- Sotavalta O. 1963. The flight-sounds of insects.— In: *Acoustic behaviour of animals*. R. G. Busnel (Ed). Amsterdam — London — N. Y.
- Stewart L., Kasson J. M. 1966. A visual image model for neural activity in speech perception. *Bionics Sympos.*, 3—5 May, Wright — Patterson — Air Force Base, Ohio.
- Tembrock G. 1963. Acoustic behaviour of mammals.— In: *Acoustic behaviour of animals*. R. G. Busnel (Ed.). Amsterdam — London — N. Y.
- Ueda R., Watanabe Y., Tsuji R. 1950. Study on surface electricity (1) on the theory and application of U-effect.— *Mem. Coll. Agric., Kyoto Imp. Univ.*, v. 57.
- Vincent F. 1963. Acoustic signals for auto-information or echolocation. In: *Acoustic behaviour of animals* R. G. Busnel (Ed.). Amsterdam — London — N. Y.
- Wittenborn A. F. 1959. Analysis of a logarithmic solion acoustic pressure detector.— JASA, v. 31, 4.
- Wood F. G. 1954. Underwater sound production and concurrent behaviour of captive porpoises *Tursiops truncatus* and *Stenella plagiodon*.— *Bull. Marine Sci. Gulf and Garribbean*, v. 3.
- Yeager E. 1955. Electrokinetic hydrophones.— *IRE Convent. Rec.*, v. 3, pt 9.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Звук и особенности его распространения	6
1. Звуковые волны	6
2. Распространение звука над поверхностью земли	14
3. Распространение звука в мелкой воде	15
4. Звук в помещении или бассейне	17
5. Прохождение звука через границу раздела воздух — вода	20
6. Искажения звукового поля, обусловленные присутствием человека-оператора	22
Глава II. Излучатели и приемники звука	25
1. Излучатели звука	25
2. Микрофоны	32
3. Гидрофоны	35
Сферические пьезоэлектрические гидрофоны	36
Цилиндрические пьезоэлектрические гидрофоны	39
Плоские пьезоэлектрические гидрофоны	42
Электрохимические гидрофоны	49
Глава III. Градуировка микрофонов и гидрофонов	53
1. Метод взаимности	54
2. Шариковый калибратор	56
3. Метод пьезоэлектрической компенсации	57
4. Метод пистонфона	58
5. Электростатический метод	60
6. Гидростатический метод	62
7. Метод, основанный на сбросе статического давления	63
8. Метод градуировки с помощью ударной волны	65
9. Метод радиометра	69
10. Метод градуировки гидрофонов, основанный на измерении радиационного давления без использования радиометра	75
11. Метод, основанный на использовании явления искажения формы волны конечной амплитуды	77
12. Метод вибрирующего столба жидкости	84
Глава IV. Методы регистрации и частотного анализа биоакустической информации. Оценка ошибок измерений	88
1. Самописцы уровней	88

2.	Магнитная запись звука	91
3.	Спектральный анализ	101
4.	Визуальное наблюдение, фото- и кинорегистрация био- акустической информации	112
5.	Оценка ошибок измерения	115
Глава V.	Телеметрическая техника в биоакустике	120
1.	Общие понятия	121
2.	Телеметрия в биоакустике	125
Глава VI.	Моделирование, как метод исследования и его применение в биоакустике	129
1.	Математическое моделирование	130
2.	Физическое моделирование	131
Глава VII.	Некоторые результаты исследования биоакустики водных животных	136
1.	О механизме излучения звуковых сигналов дельфинами	137
2.	Направленность излучения звуков дельфинами	155
3.	Блокирование слуха дельфина от его собственных интен- сивных сигналов	157
4.	Сравнение гидролокатора дельфина с техническими гид- ролокационными системами	160
5.	Звуки рыб и механизмы их излучения	165
Приложение	170
Литература	171

Евгений Васильевич Романенко

Физические основы биоакустики

Утверждено к печати

*Институтом эволюционной морфологии
и экологии животных им. А. Н. Северцова
Академии наук СССР*

Редакторы издательства

Т. Н. Маркова, А. М. Гидалевич

Художник И. В. Таланова

Художественный редактор Н. Н. Власик

Технический редактор Н. С. Нашина

Сдано в набор 28/І 1974 г.

Подписано к печати 23/V 1974 г.

Формат 60×90^{1/16}. Бумага № 2

Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд. л. 11,4

Тираж 1100. Т-08144. Тип. зак.178

Цена 1 р. 14 к.

Издательство «Наука»

103717 ГСП. Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука»

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10