

Биоакустика



ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ БИОАКУСТИКИ

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 может быть представлена в виде тяжелого шарика, соединенного пружинками с ближайшими соседними молекулами — шариками. Если такой шарик вывести из положения равновесия, 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:

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

Здесь a_0 — амплитуда колебаний, ω — круговая частота, равная $2\pi f$, f — частота колебаний, показывающая, сколько раз в секунду молекула совершает полный цикл колебания. Частота колебаний измеряется в герцах. В формуле (1) a представляет собой расстояние колеблющейся молекулы от положения равновесия в рассматриваемый момент времени. 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. 4. Колебательный процесс распространяется вправо от точки 0. Возьмем на пути распространения волны произвольную точку А, лежащую на расстоянии r от начала координат. Колебания, начавшиеся в точке 0

в некоторый момент времени, дойдут до точки A через промежуток времени:

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

где c — скорость распространения волны.

Уравнение плоской волны, распространяющейся вдоль направления r со скоростью c , можно записать в виде

$$a = a_0 \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\omega r}{c}\right). \quad (3)$$

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

Расстояние между двумя точками, имеющими одинаковую фазу колебаний, называется длиной волны.

Звуковая волна характеризуется не только колебательным смещением, но и скоростью, ускорением, плотностью, давлением, температурой. Помимо рассмотренных плоских звуковых волн существуют цилиндрические и сферические волны. Величина колебательного смещения (a 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

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4)$$

где E — модуль упругости среды, ρ — плотность.

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

$$a = a_0 e^{-\alpha \cdot r} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\omega r}{c}\right), \quad (5)$$

где α — коэффициент поглощения.

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 мо-

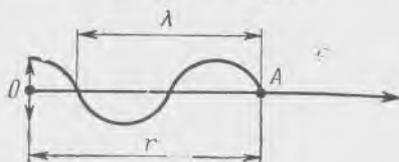


Рис. 4. Колебательный процесс (объяснения в тексте)

менту времени 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 дифракция и интерференция. Явление дифракции поясняется на рис. 5. Звуковая волна с плоским фронтом (В-В) падает на препятствие с отверстием. Пройдя сквозь отверстие в препятствии, волна перестала бы быть плоской. Фронт волны загнулся за края отверстия. Это явление загибания звуковых волн за препятствия называется дифракцией.

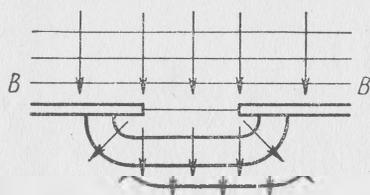


Рис. 5. Дифракция звуковых волн (объяснения в тексте)

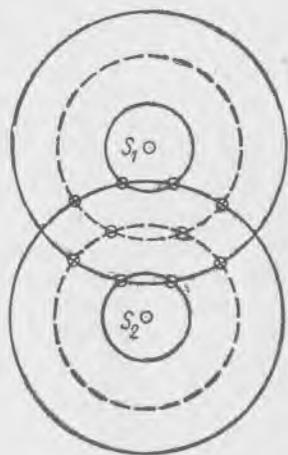


Рис. 6. Интерференция звуковых волн (объяснения в тексте)

Интерференцию волны лучше наблюдать от двух источников, излучающих сферические звуковые волны одинаковой частоты и амплитуды. Такой случай иллюстрируется на рис. 6. Условно можно считать, что сплошные окружности изображают места сжатий среды в волне в некоторый момент времени, а пунктирные — места разрежений. Там, где волны перекрываются, среда подвергнется воздействию сразу двух волн, причем эти воздействия линейно складываются (в случае 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 оказалась бы невозмущенной, ибо сжатие скомпенсируется растяжением (при одинаковых амплитудах). Таким образом в результате интерференции будем иметь (рис. 6) максимальные сжатия в точках, где пересекаются сплошные линии, максимальные растяжения там, где пересекаются пунктирные линии. А там, где пересекаются сплошные линии с пунктирными, как это видно на рис. 6, будет компенсация 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

$$a = 2 \cdot a_0 \cdot \cos\left(\frac{\omega r}{c}\right) \cos \omega t. \quad (6)$$

Стоячая волна имеет ту же частоту, что и встречные волны. А вот амплитуда стоячей волны зависит от координаты и определяется множителем $\cos\left(\frac{\omega r}{c}\right)$. В некоторых точках амплитуда все время равна нулю $\left(\cos\left(\frac{\omega r}{c}\right) = 0\right)$. Это так называемые узловые точки.

В других точках амплитуда может достигать вдвое большей величины, чем в каждой из встречных волн (там, где $\cos\left(\frac{\omega r}{c}\right) = 1$).

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. Звуковая волна в процессе распространения несет с собой определенную энергию. В акустике и биоакустике имеют дело обычно с интенсивностью звуковой волны, которая представляет собой плотность потока энергии в единицу времени:

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} \quad \frac{вт}{см^2} \quad (7)$$

или в ином виде

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 a_0^2. \quad (8)$$

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 неодинаково 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 1000—3000 гц. Для этой области частот порог слышимости достигает величины 10^{-8} эрг/см²·сек. К более низким и к более высоким частотам ухо менее чувствительно. Колебания с частотами ниже

20 гц, называемые инфразвуковыми, и более 20 000 гц — ультразвуковыми, ни при каких силах не воспринимаются как звуковые.

Колебания очень большой силы порядка сотен тысяч эрг/см² × × сек вызывают в ухе осязательное чувство давления, переходящее в болевое ощущение. Максимальная величина силы звука, от превышения 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. 7.

Субъективная громкость звука не поддается точному количественному измерению. Однако можно все же произвести оценку интен-



Рис. 7. Аудиограмма человека (объяснения в тексте)

сивности ощущения, основываясь на психофизическом законе Вебера-Фехнера, по которому изменение интенсивности ощущений пропорционально логарифму отношений 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 пороговое значение амплитуды давления, равное $2 \cdot 10^{-4}$ бар. Тогда по закону Вебера-Фехнера громкость некоторого звука пропорциональна логарифму отношения его силы к силе того же звука на пороге слышимости I_0 :

$$L = K \cdot \lg \frac{I}{I_0} \quad (9)$$

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,

$$L = \lg \frac{I}{I_0} \quad (10)$$

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

$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \text{ децибелов.} \quad (11)$$

Если вместо отношения интенсивностей в формуле (11) использовать отношение давлений в звуковой волне, помня, что интенсивность пропорциональна квадрату давления, то

$$L = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0} \text{ децибелов.} \quad (12)$$

Ниже приведены приблизительные значения уровней звука для ряда обычных звуков:

	Уровень в децибел- лах	Интенсив- ность в вт/см ²	Амплитуда давления в барах
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	$1 \cdot 10^0$	6.4
Шум оживленной улицы	70	$1 \cdot 10^1$	$2,0 \cdot 10^0$
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 ч, то энергии их голосов хватило бы лишь на то, чтобы вскипятить один стакан воды.

Распространение звуковых волн. Биоакустические исследования проводятся в ограниченном пространстве. Даже при наиболее благоприятных условиях, которые имеет исследователь при изучении звуков птиц в природе, 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. Предположим, что источник звука находится в точке O (рис. 8), а микрофон в точке P . 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 φ_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 . Здесь рассмотрен простейший вариант. Еще хуже, если источник звука и микрофон будут располагаться непосредственно на земле или на расстояниях от земли меньше 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.

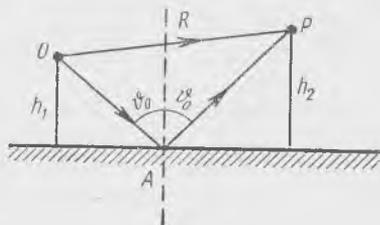


Рис. 8. Распространение звука над поверхностью земли (объяснения в тексте)

Наилучший вариант расположения источника звука и микрофона, при котором искажения минимальны, когда расстояние между источником звука и микрофоном гораздо меньше, чем расстояние от них до земли. В этом случае доля отраженного от земли звукового сигнала будет мала и микрофон зарегистрирует неискаженный

звук. 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.

Термин «мелкая вода» применяют, когда глубина водоема порядка длины звуковой волны или меньше нее. Рассмотрим идеализированный случай, когда слой воды ограничен плоским твердым дном и плоской свободной поверхностью (рис. 9). Источник звука и гидрофон располагаются в слое воды на некоторой глубине. Рас-

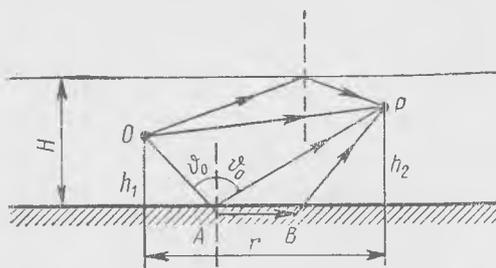


Рис. 9. Распространение звука в мелкой воде: H — глубина водоема, h_1 и h_2 — расстояния источника звука O и гидрофона P от дна водоема соответственно, r — расстояние между источником звука и гидрофоном, AB — путь, проходимый донной волной, ϕ_0 — угол падения (ориг.)

пространение звука в таком слое воды имеет следующие особенности.

1. Не все звуки могут распространяться вдоль слоя воды, а только те, частоты которых выше некоторой критической.
2. 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 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.

3. 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.

4. Усредненная интенсивность звука в слое воды с увеличением расстояния от источника звука спадает по закону $(1/r)^{\frac{3}{2}}$. Этот за-

кон является промежуточным между цилиндрическим законом $\frac{1}{r}$, выполняющимся при полном отражении от границ слоя, и сферическим законом $\frac{1}{r^2}$, выполняющимся при отсутствии отражений от границ.

Основные закономерности распространения звука в помещении и бассейне одинаковы, поэтому в дальнейшем речь будет идти только о помещении (имея в виду одновременно и бассейны). Если биоакустические измерения проводятся в помещении, то оно 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 звук не будет отражаться обратно в помещение. Однако 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 звучит сигнал сложной формы, содержащий широкий спектр частот, то помещение выделит из общего спектра те частоты, которые совпадают с собственными частотами помещения. Естественно, такой звуковой сигнал будет заметно искажен. Особенно заметны искажения в низкочастотной части спектра, где резонансные частоты помещения довольно далеко отстоят друг от друга по шкале частот. На высоких частотах разница между резонансными частотами в процентах значительно меньше, поэтому вносимые искажения сигнала также меньше, чем на низких частотах.

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. Поэтому при биоакустических измерениях не следует располагать источники звука и микрофоны (гидрофоны) по углам и ребрам помещения (бассейна).

Неравномерность звукового поля в помещении сильно зависит от симметрии помещения. Чем более симметрично помещение, тем больше диапазон частот, в котором наблюдаются флуктуации интенсивности, и тем оно менее пригодно для проведения в нем биоакустических измерений. Например, хуже всего обстоит 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 прямоугольном: это помещение с непараллельными противоположными стенами, а также потолок и полом. Обычно такой формы делают так называемые звукомерные камеры.

Рассмотрим распространение звука в незаглушенном помещении или бассейне. Биоакустические измерения в незаглушенном помещении (диффузном поле) можно проводить в том случае, например, когда надо изучить спектр достаточно длительного (по сравнению с временем реверберации) и достаточно высокочастотного звукового сигнала. Если же ставится задача 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, конусы 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 проверяется чаще всего путем измерения спадания звукового давления при изменении расстояния от точечного источника. При хорошем заглушении закон спадания должен быть сферическим.

Вопрос о прохождении звука через границу 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 издают звук птицы, люди. Спрашивается, будут ли звуки, распространяющиеся в воздухе, проникать в воду и служить помехой? С этой точки зрения проанализируем процесс прохождения звука через границу воздух — вода. Подсчеты показывают, что из воздуха в воду проходит всего 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 отлучилось выше, во много раз больше акустического сопротивления воздуха.

Звуки птиц и человеческая речь в воздухе 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 $13^{\circ}42'$ затухание звука в воде обычное (не очень большое). Этот угол называется углом полного внутреннего отражения. При больших углах падения звуковая волна, прошедшая в воду, далеко не распространяется и очень быстро затухает. Это так называемая неоднородная волна. 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 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 можно ответить на вопрос, поставленный выше. 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.

Биоакустические исследования на этапе регистрации звуков наземных животных осуществляются обычно человеком — оператором, в распоряжении которого есть регистрирующая аппаратура в виде микрофона и магнитофона.

Любой предмет (в том числе и человек — оператор), находящийся в звуковом поле, искажает его, отражая и рассеивая звуковые волны. В этом случае поле рассеяния накладывается на поле 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 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. Чтобы можно было пренебречь искажениями поля в присутствии человека — оператора, он должен находиться при измерениях не ближе, чем в 1 м от микрофона. Лучше, если микрофон установлен на подставке, а человек находится в отдалении. В равной мере это относится ко всякому предмету, находящемуся в поле регистрируемых звуковых волн. Лучше при измерениях микрофон устанавливать на открытом месте вдали от камней, деревьев и т. п.

Излучатели звука. Из технических устройств, предназначенных для излучения в воздушной среде, наиболее распространен электродинамический громкоговоритель. Характеристики излучения громкоговорителя в большой мере зависят от способа его акустического оформления. Существует 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 помещается звукопоглощающий материал с целью подавления собственных колебаний воздушного объема. В первом случае громкоговоритель работает как двусторонний поршень. Излучение в области самых низких частот ограничивается резонансом подвижной системы.

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 худшие.

Согласно ГОСТ 7323—35 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 0,1 Вт.

Весьма перспективны излучатели звука, основанные на использовании колебаний ионного облака — ионофоны, а также электростатические излучатели, обладающие хорошими частотными характеристиками при малых нелинейных искажениях.

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.

Излучатели электромагнитного типа используются 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 частотах (до 2000 гц) могут быть применены электродинамические и электромагнитные излучатели, на более высоких звуковых частотах — магнитострикционные, пьезоэлектрические и электростатические.

Излучатели, эффективные в воздухе, не обеспечивают той же эффективности в воде, а подводные излучатели малоэффективны в воздухе. Тем не менее иногда излучатели, предназначенные для

работы в воздухе, могут быть успешно применены 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 резонатора с сосредоточенными параметрами. Роль массы играет присоединенная масса воды, а роль упругости — упругость воздуха в оболочке. Добротность такого излучателя невысока, поэтому он может эффективно излучать в достаточно широком диапазоне частот от десятков до сотен герц. Наибольшее распространение получили излучатели из пьезокерамики титаната бария и цирконата титаната свинца (ЦТС) сферической и цилиндрической формы (рис. 10). Причем используют такие излучатели обычно на частотах ниже их первой резонансной частоты при возбуждении радиальных колебаний.

Излучатели электростатического типа с твердым диэлектриком пока не получили в биоакустике широкого распространения, но они обладают некоторыми полезными свойствами, благодаря которым они даже более предпочтительны, чем пьезоэлектрические. Конструкция излучателя показана на рис. 11. В качестве диэлектрика используют тонкие (6—20 мк) органические пленки, на которые нанесен металлический слой, служащий одним электродом. Второй электрод — массивный металлический корпус излучателя. Под воздействием постоянного и переменного электрических полей, одновременно приложенных к пленке, она 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. Достоинство электростатических излучателей в том, что относительно мала зависимость изменения звукового давления от частоты. К недостаткам этих излучателей следует отнести сильную зависимость чувствительности от статического давления, что требует использования специальных конструктивных мер для ее компенсации.

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

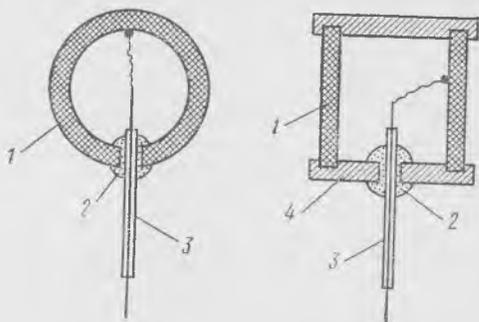


Рис. 10. Сферический и цилиндрический излучающие элементы (Клюкин, Колесников, 1968):

1 — пьезоэлементы, 2 — изолятор, 3 — вывод внутреннего электрода, 4 — крышка цилиндра

быть использованы описанные выше сферические и цилиндрические пьезокерамические излучатели, работающие в резонансном режиме. Однако сферы и цилиндры из пьезокерамики иногда бывают более дефицитными, чем плоские элементы (пьезокерамические диски). Поэтому рассмотрим одну резонансную конструкцию с использованием плоских пьезокерамических активных элементов. Такая конструкция может быть изготовлена на любую рабочую частоту в нужном диапазоне частот. Схематически конструкция показана на рис. 12. Вся конструкция представляет собой резонансный вибратор, в средней части которого вклеена пьезокерамическая пластинка. Каждую половину вибратора (от нейтральной линии вправо и влево) можно рассматривать отдельно как четвертьволновой вибратор. Излучающим поршнем служит головная насадка. Крепление всей конструкции лучше всего осуществлять в области

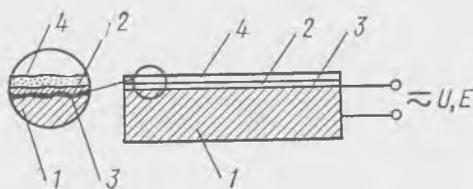


Рис. 11. Электростатический излучатель (Клюкин, Колесников, 1968):

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

нейтральной линии, являющейся узлом колебательной скорости.

Описанные конструкции могут быть изготовлены на фиксированные частоты в диапазоне от 5 до 120 кгц.

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. Микрофоны характеризуются следующими параметрами:

осевой чувствительностью — отношением напряжения холостого хода, развиваемого микрофоном, к звуковому давлению гармонической волны, падающей в направлении этой оси; направленностью — распределением чувствительности микрофона при падении на него звуковой волны под различными углами, отнесенной к его осевой чувствительности; уровнем собственного шума.

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 направленностью; их характеристика направленности изображается в виде окружности. С возрастанием частоты приемники давления становятся

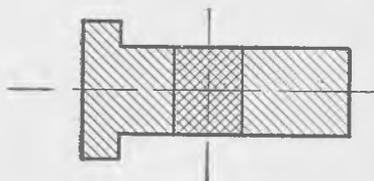


Рис. 12. Резонансный вибратор (Шофилд, 1965)

направленными, их характеристика направленности вытягивается в направлении оси микрофона.

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. 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 равна нулю сила, действующая на диафрагму.

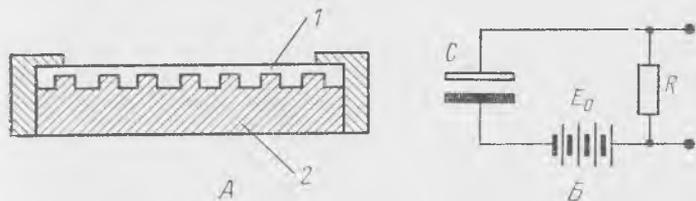


Рис. 13. А — принцип устройства капсуля конденсаторного микрофона; Б — схема его включения (Клюкин, Колесников, 1968): 1 — мембрана, 2 — массивный электрод, С — электрическая емкость, E_0 — поляризирующее напряжение, R — сопротивление нагрузки

Односторонняя направленность достигается в микрофонах, называемых комбинированными приемниками. Первоначально такие приемники осуществлялись путем конструктивного объединения двух микрофонов — приемника давления и приемника градиента давления. 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 другая зависит.

Устройство электродинамического микрофона в принципе такое же, как и электродинамического громкоговорителя. Но 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).

Принцип устройства капсуля конденсаторного микрофона приемника давления показан на рис. 13, 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 нем) 20÷30 мк. Мембрана и массивный электрод образу-

ют электрическую емкость C порядка 100 пф. К электродам подключается постоянное поляризирующее напряжение E_0 (рис. 13, 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 появляется переменная разность потенциалов, которая усиливается и регистрируется.

Конденсаторные микрофоны, работающие как приемник давления, на низких частотах являются ненаправленными, однако с повышением частоты сигнала появляется заметная направленность. Более широкое применение получили конденсаторные микрофоны, работающие как комбинированные приемники. Конденсаторные микрофоны могут быть 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. Защита от шумов ветра бывает очень полезна при биоакустических измерениях в полевых условиях.

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 производятся 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 широко распространение получили гидрофоны на основе пьезокерамики, в основном сферические и цилиндрические. Устройство сферических и цилиндрических гидрофонов совершенно аналогично устройству излучателей. Характеристика направленности сферических гидрофонов в экваториальной плоскости близка к круговой. В меридианальной же плоскости (в плоскости держателя) характеристика направленности заметно искажена. Что касается характеристики направленности цилиндрических гидрофонов, то они подобны характеристикам направленных сферических гидрофонов, однако их неравномерность в плоскости держателя выражена сильнее из-за отсутствия сферической симметрии самого чувствительного элемента в этой плоскости.

Чувствительность сферических и цилиндрических гидрофонов невысока — в лучшем случае десятки 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 малопригодны, так как уровень этих звуков составляет в лучшем случае всего 100—120 дБ.

Для приема сравнительно слабых биоакустических сигналов под водой разработаны чувствительные гидрофоны с механической трансформацией звукового давления. Сущность механической трансформации звукового давления может быть пояснена на следующем простейшем примере (рис. 14). Пусть звуковое давление $P_{зв}$ принимается некоторой пластинкой с поверхностью S . Сила, с которой плоская ультразвуковая волна действует на поверхность при нормальном падении на нее, равна произведению $P_{зв}S$. Если пластина S опирается на миниатюрный пьезоэлектрический чувствительный элемент, имеющий поперечное сечение s , то вся сила $P_{зв}S$ распределится по поверхности s и давление на чувствительном элементе будет во столько раз больше звукового давления, во сколько раз поверхность S больше поверхности s . В случае плоской приемной диафрагмы, опирающейся на чувствительный элемент малого размера, как показано на рис. 14, коэффициент трансформации может достигать нескольких тысяч.

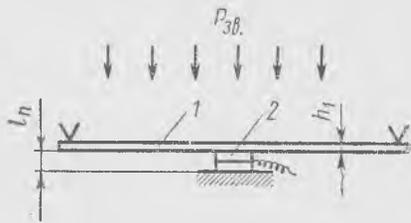


Рис. 14. Схема механической трансформации давления (ориг.):
 1 — приемная пластинка, 2 — пьезоэлемент,
 h_1 — толщина пластинки, h_l — толщина пьезоэлемента

Гидрофоны с такой трансформацией давления широкополосны в диапазоне частот от единиц гц до десятков кгц и их чувствительность составляет сотни и даже тысячи мкв/н/м². Отдельные экземпляры приемников, предназначенные для работы в диапазоне низких звуковых частот, имеют чувствительность около 100 000 мкв/н/м².

Конструктивно гидрофон выполнен в виде корпуса 1 (рис. 15) с выфрезерованным углублением для монтажа катодного повторителя, приемной пластинки 2 и прижимного кольца 3. Приемная пластинка может быть выполнена заодно с кольцом в виде навинчивающейся крышки. Пьезоэлемент 4 из сульфата лития слегка зажимается с помощью кольца 3 между корпусом и приемной пластинкой. Питание катодного повторителя осуществляется по кабелю 5 от стороннего источника (на рисунке не показан). По этому же кабелю электрический сигнал с выхода катодного повторителя подается к регистрирующей аппаратуре.

В описанных выше гидрофонах в качестве активного чувствительного материала использована пластинка из сульфата лития. Существуют и другие пьезоматериалы, которые могут быть использованы при конструировании гидрофонов. В табл. 2 приложения приведены основные параметры некоторых пьезоматериалов.

Выше были описаны методы и приборы для излучения и приема звука. Однако не менее важна задача измерения, регистрации звука и его дальнейшего анализа. Поскольку на выходе микрофонов и гидрофонов имеют дело с электрическими сигналами, обусловленными воздействием на них звука, то регистрация и анализ звука сводятся к регистрации и анализу соответствующих электрических

сигналов. Измерение и регистрация электрических сигналов осуществляется с помощью осциллографов (электронных и шлейфовых), самописцев уровня и магнитофонов.

Осциллографы. Осциллографы позволяют визуально наблюдать электрические сигналы и представлять их в форме осциллограмм на экранах электронно-лучевых трубок (электронные), на киноленте или светочувствительной бумаге (шлейфовые). Осциллограммы показывают зависимость амплитуды сигнала от времени. Осциллографы представляют собой весьма сложные электронные или оптико-механические приборы, описание устройства которых выходит за рамки настоящего курса.

Самописцы уровня. Самописец уровня представляет собой электронный мост, самобалансирующийся благодаря электромеханиче-

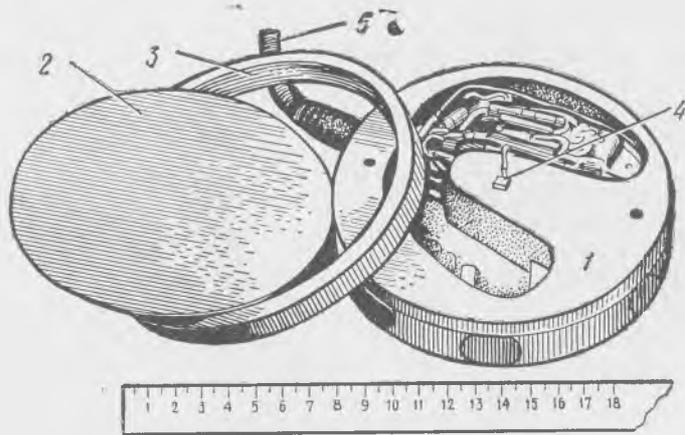


Рис. 15. Конструкция гидрофона (объяснения в тексте) (ориг.)

ской отрицательной обратной связи. Блок-схема самописца изображена на рис. 16. 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 5, 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 тока нет 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

Измеряемое медленно меняющееся напряжение U складывается с постоянной составляющей U_0 от специального источника 10, чтобы сумма их $U_1 = U + U_0$, представляющая собой записываемое напряжение, была знакопостоянной, и подается на аттенюатор 1. Напряжение, снимаемое ползунком с функционального делителя 2, преобразуется инвертором 11 в знакопеременное напряжение приблизительно трапецеидальной формы и поступает на вход усилителя переменного тока 13. Частота повторения импульсов преобразованного напряжения находится в рабочем диапазоне частот усилителя переменного тока, благодаря чему запись мгновенного значения медленно изменяющегося напряжения осуществляется в остальном, как и запись уровня напряжения звуковых и ультразвуковых частот.

Бумажная лента может перемещаться с различной скоростью, меняя таким образом масштаб времени. Практическая конструкция прибора обеспечивает выбор условий для оптимальной записи сигналов: скорости передвижения пера и его инерционности, а также ограничение в области низких частот. В некоторых самописцах предусмотрено измерение пиковых, средних и средних квадратичных значений сигнала.

Магнитная запись звука. Магнитная запись основана на способности ферромагнитных материалов приобретать и сохранять остаточную намагниченность в результате воздействия внешнего магнитного поля. На рис. 18 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 звуковой частотой, после усиления в усилителе 2 подводится к магнитной записывающей головке 3. Головка записи представляет собой электромагнит, кольцевой сердечник которого из ферромагнитного материала имеет немагнитный зазор. Проходящий по обмотке 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

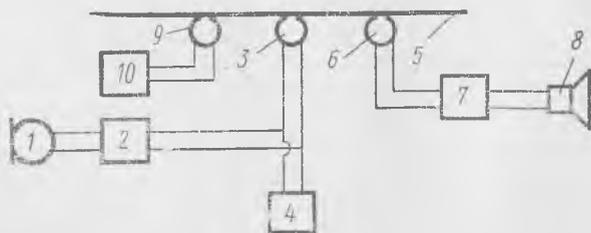


Рис. 18. Функциональная схема тракта звукопередачи при магнитной записи и воспроизведении звука (объяснения в тексте) (по Ключину, Колесникову, 1968)

записи. 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 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 5, 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 магнитной фонограммы воспроизводится 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 замыкается 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 в усилителе 7 электрический сигнал, получаемый в цепи головки воспроизведения, подводится к громкоговорителю 8. Стирание записи с фонограммы производится с помощью специальной стирающей головки 9, в обмотке которой для этого пропускается 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.

Магнитная запись имеет и некоторые недостатки, приводящие к искажению записываемого сигнала. К числу таких искажений прежде всего относятся: детонации, копирэффekt 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 отличаются от нелинейных.

При воспроизведении сигнала с магнитной фонограммы иногда прослушиваются слабые повторные сигналы. Причина их появления в так называемом копирэффекте. Сущность его заключается в том,

что магнитное поле, окружающее намагниченные участки фонограммы, воздействует на соседние слои магнитной ленты, смотанной в рулон. В результате слои ленты, примыкающие к участку фонограммы, частично намагничиваются этим полем, на них образуются «магнитные отпечатки» записанного сигнала. Нелинейные искажения при магнитной записи могут возникнуть из-за магнитной нелинейности головки записи и магнитной нелинейности носителя.

Спектральный анализ. Спектральным анализом называется определение амплитуд и частот колебаний, входящих в состав сложного сигнала. Спектральный анализ бывает последовательным и одновременным. При последовательном анализе спектрограмма, представляющая собой зависимость величин спектральных компонент от частоты, получается в результате многократного исследования сигнала с помощью одного частотноизбирательного элемента (фильтра), изменяющего свои параметры, или с помощью ряда избирательных элементов, подключаемых поочередно.

При одновременном анализе используется набор фильтров, включаемых параллельно таким образом, чтобы одновременно на выходах фильтров получать все составляющие исследуемого колебания. При одновременном анализе имеется возможность визуально наблюдать полную картину спектра сложного сигнала (спектрограмму). 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 фильтров 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. В настоящее время выпускаются анализаторы и спектрометры следующих основных типов: набор фильтров со ступенчатым переключением — такая система осуществляет последовательный анализ; фильтровые спектрометры с автоматическим переключением, предназначенные для осуществления последовательного и одновременного анализа с постоянной относительной полосой пропускания; гетеродинные спектрометры, обеспечивающие последовательный анализ с постоянной шириной полосы пропускания.

Одна из наиболее удачных разработок для осуществления спектрального анализа сложных сигналов в звуковом диапазоне частот — сонограф Kay Electric (США). Сонограф дает трехмерное представление спектра сигнала на электротермической бумаге (сонограмму сигнала). Электротермическая бумага покрыта специальным составом, который прожигается электроискровым пером в местах, соответствующих определенной спектральной плотности энергии сигнала. В результате плотность почернения бумаги на сонограмме

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 того, сонограф позволяет получать и огибающую амплитуды сигнала в общей полосе частот в зависимости от времени. Время анализа сонографа 1,3 мин. На рис. 19 приведена фото-

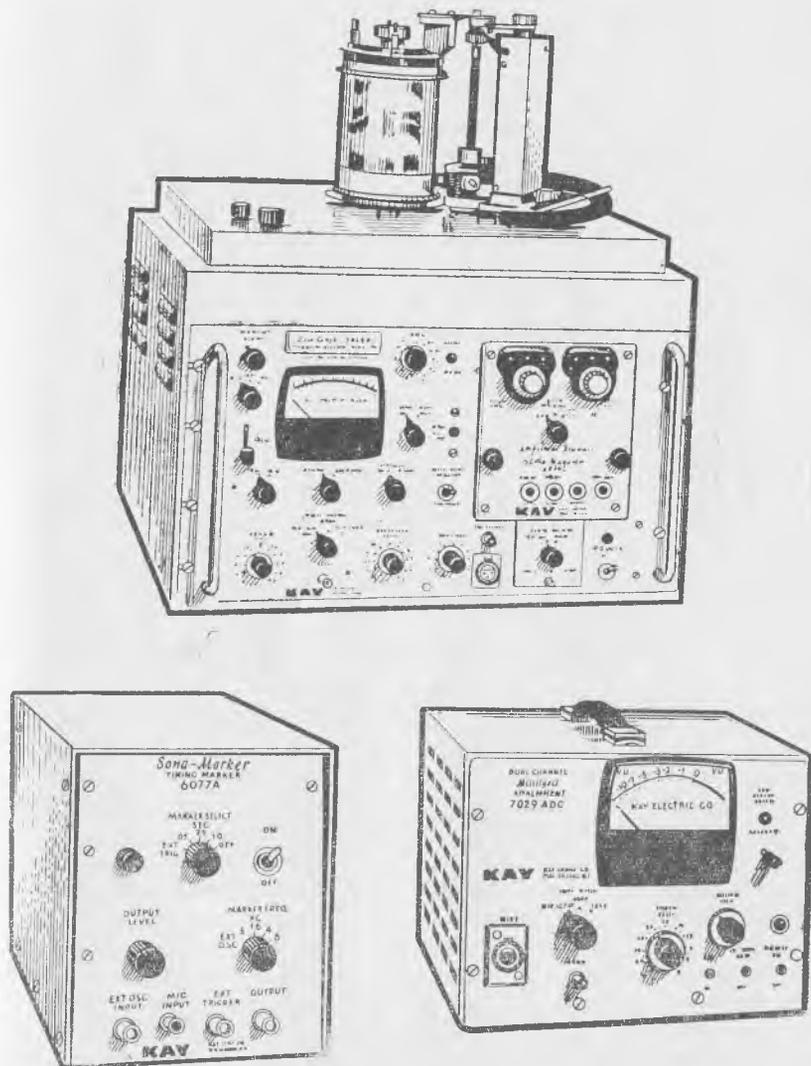


Рис. 19. Сонограф и его рабочие блоки (ориг.)

графия сонографа и его рабочих блоков. На рис. 20 показана в качестве примера сонограмма импульсных сигналов дельфина.

В практике биоакустических измерений наиболее часто встречаются следующие виды сигналов.

Периодические сигналы сложной формы. Их спектр характерен дискретными частотными составляющими. Примером таких сигналов могут служить свистовые сигналы дельфинов, звуки некоторых рыб и птиц.

Случайные стационарные сигналы. Содержат 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 или методом последовательного 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. 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 коли-



Рис. 20. Сонограмма эхолокационных импульсов дельфина (ориг.)

чественные характеристики магнитной записи не всегда обеспечивают необходимую точность измерений (особенно в области частот выше 10 кгц).

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. 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.