

МОРСКАЯ ПОДВОДНАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕДАЧА ЗВУКА ПОД ВОДОЮ ¹⁾.

К. В. Дрюсдэл.

Почти все отрасли гидромеханики имеют значительные технические приложения и только акустика вплоть до последних лет оставалась чисто академической дисциплиной, которой лишь немногие ученые уделяли серьезное внимание. Колокола, гонги, свистки, сирены и музыкальные инструменты с давних времен употреблялись как для развлечения, так и для сигнализации, но их конструирование и усовершенствование шло почти всегда эмпирическим путем и при малом участии физиков.

Война произвела в этой области, как и во многих других, резкие изменения. Акустика является теперь не только важной областью техники связи, но начинает применяться даже в инженерном деле, давая новый способ передачи силы. Об этом можно судить по работам М. Константинеско, который применяет акустический метод для целей сверления скал и для клепания и показывает, как его можно приложить для приведения в движение моторов и других механизмов. Немногие области науки открывают сейчас такое обширное поле для новых изобретений, как акустика.

Акустическая сигнализация особенно важна для мореплавания, так как звук является единственной формой энергии, которая может быть передана через воду без значительного поглощения. Относительно высокая электропроводность воды делает ее почти непрозрачной для света и электрических волн.

В настоящей статье излагаются принципы акустической сигнализации под водой, а также кратко затронуты некоторые другие важные для навигации проблемы, как, например, определение местоположения источников звука и определение глубин.

Как хорошо известно, звук представляет из себя колебательные возмущения в материальных средах: газах, жидкостях или твердых телах и является процессом чисто механической природы. Звучащее

¹⁾ C. V. Drysdale. Submarine Signaling etc. из сборника The Mechanical Properties of Fluids, составленного при участии Г. Лэмба и др.

тело, колеблясь, производит быстро следующие друг за другом сжатия и разрежения окружающей среды, которые распространяются во все стороны с определенной скоростью. Важно отметить, что при распространении звука в жидкостях и газах движение частиц происходит всегда продольно по отношению к направлению волны, в виду чего звук не дает явлений поляризации, характерных для света.

ОСНОВНЫЕ КАЧЕСТВА ЗВУКА.

Звуки разделяются на музыкальные тоны и шумы. Музыкальные тоны вполне характеризуются числом колебаний основного тона, амплитудой колебания и формой кривой; эти три фактора определяют высоту, силу и тембр звука.

Шумы отличны от музыкальных тонов отсутствием регулярного характера колебаний и состоят из ряда колебаний различной высоты и силы. С точки зрения акустической передачи и приема, речь состоит в значительной степени из шумов, так как колебания, характеризующие речь, имеют сплошь и рядом нерегулярный характер, например, все согласные. Звуки, даваемые моторами, кораблями и т. п., также носят характер шумов. Открытие и распознавание таких звуков представляет значительные трудности, так как все почти передающие и воспринимающие аппараты имеют более или менее „селективный“ характер, т.-е. отвечают сильнее на некоторые определенные частоты и относительно нечувствительны к другим. Каждый знает, что телефон и граммофон воспроизводят некоторые звуки громче, чем другие; при акустической сигнализации, как и при радиотелеграфной передаче, значительно выгоднее применять „настроенные“ системы, но в таком случае усиления определенных частот всегда получаются за счет ослабления всех других.

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ.

Точное знание скорости распространения звука весьма важно для акустической сигнализации, особенно же в вопросах определения местоположения и расстояний. Скорость звука в различных средах весьма различна, так как она зависит от плотности и упругости среды и, кроме того, от ее состава, давления и температуры. Здесь мы остановимся главным образом на скоростях звука в воздухе и в морской воде, хотя при расчете передающих и принимающих аппаратов необходимо знать также акустические свойства и других веществ.

Для воздуха при температуре $t^{\circ} C$, скорость звука равна

$$v = 331,3 + 0,552 \, t \, \frac{м}{сек}.$$

Для морской воды, согласно последним измерениям А. Вуда,

$$v = 1449,6 + 4,21 t + 0,037. t^2 \frac{\text{м}}{\text{сек}},$$

при содержании солей 35 частей на тысячу; скорость возрастает на $1,13 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ при увеличении солености на 1 промилле.

Таким образом для скорости звука при 20° в воздухе мы имеем $342,5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, а для морской воды нормального состава — $1520 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, то-есть скорость в морской воде примерно в 4,5 раза больше скоростей в воздухе.

Для длины волны при частоте 500 периодов получим в воздухе $\lambda = 68,6 \text{ см}$, а в морской воде: $\lambda = 303,8 \text{ см}$.

Как мы увидим далее, передача длинных волн в воде представляет значительные трудности.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА ЧЕРЕЗ РАЗЛИЧНЫЕ СРЕДЫ.

Как показал впервые Ньютон, скорость звука в данной среде можно вычислить, если известны ее объемная упругость k и плотность ρ . Легко вывести, что скорость распространения звука будет

$v = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$. Но если принять во внимание, что при быстрых колебаниях звуковой частоты возникающие при сжатии местные нагревания, а при расширении — охлаждения не успевают рассеяться, то необходимо в написанной формуле ввести адиабатную упругость вместо упругости k при постоянной температуре, т.-е. изотермической. Для газов при нормальном атмосферном давлении изотермическая упругость равняется величине давления, т.-е. около 10^6 дин на см^2 , адиабатная же упругость в 1,41 раза больше. Плотность воздуха равна $0,00129 \text{ г на см}^3$. Таким образом скорость звука в воздухе будет:

$$v = \sqrt{\frac{1,41 \cdot 10^6}{0,00129}} = 33000 \frac{\text{см}}{\text{сек}},$$

что близко сходится с величиною, найденной на опыте.

Теория позволяет подсчитать количество звуковой энергии, переносимой синусоидальной волной, а также выяснить явления, происходящие при переходе звука из одной среды в другую, что имеет первостепенное значение в вопросе подводной сигнализации. Можно показать, что между давлением P , вызываемым колебаниями (переменный избыток над средним давлением), и скоростью v движущейся частицы в данной точке среды существует соотношение $P = RV$,

где $R = \sqrt{k\rho}$. Это соотношение подобно закону Ома в электричестве, при чем величина R , по почину Бриллие¹⁾, называется „акустическим сопротивлением“ среды. Энергия w , прошедшая через единицу площади волнового фронта, будет:

$$\frac{1}{2} P_{\max} V_{\max}, \text{ т.-е. } \frac{1}{2R} P_{\max}^2 \text{ или } \frac{R}{2} V_{\max}^2.$$

Для синусоидальной волны с частотою n периодов в секунду, т.-е. с круговою частотою $\omega = 2\pi n$, мы имеем $V_{\max} = \omega \cdot a$, где a —амплитуда смещения; таким образом, получаем $w = \frac{\omega}{2} a P_{\max} = \frac{R}{2} \omega^2 a^2$ эргов через см^2 в секунду.

Для обычной морской воды, для которой $k = 2,2 \cdot 10^{10}$ дин см^2 и $\rho = 1,028$, $R = \sqrt{k\rho} = 24 \cdot 10^4$, так что для частоты 500 ∞ и при амплитуде 0,1 мм, мощность, протекающая через 1 см^2 , будет 7 ватт.

Когда звук переходит из одной среды в другую, можно доказать, что при различных акустических сопротивлениях двух сред всегда будет иметь место известное отражение на промежуточной поверхности. Если обозначить через r отношение акустического сопротивления второй среды к сопротивлению первой, то мы получим следующие выражения для давлений и скоростей частиц на границе первой и второй среды:

$$P_2 = \frac{2r}{r+1} P_1; P'_1 = \frac{r-1}{r+1} P_1; V_2 = \frac{2}{r+1} V_1; V'_1 = \frac{r-1}{r+1} V_1,$$

где P_1 давление и V_1 скорость частиц в первоначальной волне

$$\begin{array}{ccccccc} \text{„ } P_2 & \text{„} & \text{„ } V_2 & \text{„} & \text{„} & \text{в прошедшей волне} \\ \text{„ } P'_1 & \text{„} & \text{„ } V'_1 & \text{„} & \text{„} & \text{в отраженной волне.} \end{array}$$

Если вторая среда имеет высокое сопротивление в сравнении с первой, т.-е. r очень велико, то

$$P_2 = 2P_1; P'_1 = P_1; V_2 = 0; V'_1 = V_1,$$

т.-е. давление на граничной поверхности равно двойному давлению первоначальной волны, а скорость, равная $(V_1 - V'_1)$, равна 0, так как движения в прямой и отраженной волне равны и происходят в обратных направлениях. Таким образом, волна целиком отражается обратно в первую среду, никакого перехода звука во вторую среду не происходит.

1) Н. Brillié, Le Génie Civil, 23 и 30 Авг. 1919; „Modern Marine Problems in War and Peace“, 11-ая вельинская лекция д-ра С. V. Drysdale в Институте Инженеров Электриков: Journ. Inst. Electr. Eng. 58, № 293, July 1923, p. 591.

Наоборот, если вторая среда имеет очень малое акустическое сопротивление по сравнению с первой, т.-е. r очень мало, то $P_2=0$; $P_1'=-P_1$, $V_2=2V_1$ и $V_1'=-V_1$. В этом случае полное давление на границе $(P_1+P_1')=0$, а скорость $(V_1-V_1')=2V_1$, но и в этом случае опять нет никакого перехода звука во вторую среду, так как $P_2=0$; волна целиком отражается, при чем направление скорости частиц меняется на обратное. В первом случае граничная поверхность аналогична «неподвижному» концу колеблющейся струны или стержня или закрытой трубы, во втором—«свободному» концу или открытой трубе.

Если две среды имеют одинаковые акустические сопротивления, т.-е.

$$r=1, \text{ то: } P_2=P_1; P_1'=0, V_2=V_1; V_1'=0;$$

волна проходит во вторую среду без отражения. Этот случай является идеальным как для приемника, так и для передатчика звука.

Если акустические сопротивления двух сред не равны, то легко показать, что отношение энергии в прошедшей волне к энергии первоначальной, которое можно назвать коэффициентом проникновения звука (η), будет:

$$\eta = \frac{4r}{(r+1)^2};$$

для отраженной же волны отношение энергий будет:

$$\left(\frac{r-1}{r+1}\right)^2.$$

Мы видели, что для воды $R_1=14 \cdot 10^4$, для воздуха $R_2=40$ (см. табл. на стр. 211), так что:

$$r = \frac{R_2}{R_1} = 2,86 \cdot 10^{-4}$$

и

$$\eta = \frac{4r}{(r+1)^2} = 0,0011,$$

т.-е. из воды в воздух проникает немного более 0,1% энергии. Это сразу указывает на трудность при подводном слушании, так как звук, пришедший по воде, прежде чем достигнуть до барабанной перепонки уха, должен перейти из воды в воздух.

Для стали $R \cong 395 \cdot 10^4$, так что при переходе из воды в сталь r равно приблизительно 28 и коэффициент проникновения будет около 13%, тогда как из стали в воздух он будет равен всего 0,004%. Таким образом, для звука, приходящего из воды через стенки корабля во

внутренний воздух, коэффициент проникновения будет 13% от 0,004%, т.е. 0,00052%; при этом принимается, что стенки корабля не достаточно тонки, чтобы служить мембраной, при чем получается, конечно, большее пропускание звука, чем при толстых стенках. Таким образом, в некоторых случаях потеря энергии весьма велика, и это повело к тому, что корабельные слуховые устройства пришлось прикреплять или непосредственно на корпус корабля, или в специальных резервуарах с водою, прикрепленных к корпусу изнутри, как будет описано дальше.

Следующая таблица акустических свойств различных сред взята из работы Брилле.

Среда	Объемная упру- гость кг на м.м ³	Плотность в ед. C.G.S	Скорость $v = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$ м/сек	Акуст. сопро- тивление $R = \sqrt{k\rho}$ C.G.S ед.	
Сталь	2.10 ⁴	7, 8	5100	395.10 ⁴	
Чугун	0,95.10 ⁴	7, 0	3680	258.10 ⁴	
Латунь	0,65.10 ⁴	8, 4	2780	234.10 ⁴	
Бронза	0,32.10 ⁴	8, 8	1910	168.10 ⁴	
Свинец	0,06.10 ⁴	11, 4	725	82,5.10 ⁴	
Дерево {	Тик	0,16.10 ⁴	0,86	4300	37.10 ⁴
	Сосна	0,09.10 ⁴	0,45	4470	20.10 ⁴
	Бук	0,06.10 ⁴	0,80	2740	22.10 ⁴
Вода	2.10 ³	1,0	1410	14.10 ⁴	
Каучук	< 1 (зависит от сорта)	1 (прибл.)	<100	<1.10 ⁴	
Воздух	1,40.10 ⁻²	0,0013	328	0.004.10 ⁴	

Следует отметить, что величина акустического сопротивления для сосны или бука близка к его величине для воды и, следовательно, звук проходит из воды в дерево и обратно без сильного отражения.

Приемники, воспринимающие давление и смещение.

Из изложенной теории распространения колебаний очевидно, что звук можно обнаружить или по производимым им изменениям давления, или по смещениям, которые он производит; точно так же источник электричества может быть обнаружен или по электрическому напряжению, или по току (смещению), которое он производит. Акустические приемники, таким образом, можно разделить на приемники, обнаруживающие давление, аналогичные электрическим вольтметрам, и приемники, обнаруживающие смещение, соответствующее амперметрам.

Это подразделение нельзя считать строго научным, так как приемник не может быть возбуждаем только давлением или только смещением. Мы видели, что энергия, протекающая в секунду через единицу площади волнового фронта, равна $\frac{1}{8} P_{max} V_{max}$, откуда ясно, что для восприятия энергии необходимо, чтобы приемник воспринимал и давление и скорость смещений. Идеальный приемник давлений в действительности представлял бы из себя отражатель с неподвижной стенкой, идеальный же приемник смещений—отражатель со свободной стенкой, а мы видели, что в обоих указанных случаях энергия не передается, а вся отражается назад.

Однако, различие приемников давления и смещения можно считать полезным, равно как и различие между вольтметрами и амперметрами. Вольтметр является, главным образом, измерителем электрического напряжения, хотя он требует незначительного тока. Амперметр есть, главным образом, измеритель тока, хотя он требует небольшого падения напряжения. Аналогично приемник давления обладает относительно твердой мембраной, которая испытывает лишь малые смещения под действием колебаний; наоборот, приемник смещений снабжается весьма податливой мембраной. Различие между двумя родами приемников играет большую роль при построении направленных приемников в виду того, что колебания давления в однородной среде одинаковы во всех направлениях, тогда как смещения происходят по линии распространения волн. В этом случае приемник давлений при вращении в различных направлениях не дает никакой разницы, а приемник смещений покажет максимум, когда он направлен прямо к источнику звука.

Очевидно, что наилучшие результаты в отношении чувствительности приемника получатся при условии полного поглощения всей падающей на него энергии, а это может получиться только, если данное переменное давление на мембрану производит такое же смещение, какое имеет место во внешней среде, т.-е. энергия целиком проходит в приемник, не отражаясь.

Вопросы конструкции подводных приемников и гидрофонов будут разобраны далее, но здесь будет уместно остановиться на основных идеях, положенных в основу их устройства. Простейший из таких приемников, аналогичный простой слуховой трубе, представляет собою длинную металлическую трубку с мембраной на нижнем конце; он называется часто трубой Брокá. Если такую трубку погрузить в воду, то звук из воды передается через мембрану в воздух внутрь трубы, и наблюдатель слышит его у свободного конца трубы. Приемник воспринимает довольно много энергии, но не очень чувствителен, так как не дает возможности усилить звук, и не особенно удобен, так как слушание через длинные изогнутые трубы затруднительно и возможно

самое большое на несколько метров под водой. Поэтому во всех современных гидрофонах звук сперва превращается в форму электрических колебаний посредством микрофонов или магнетофонов, от которых ток подводится к обычному телефону, помещенному в удобное для слушания место.

В виду большой чувствительности, обычно применяются микрофоны. Соответственно приемникам давления и смещения имеется два типа микрофонов. Первый из них, так называемый микрофон с массивной опорой (solid back type), в котором некоторое число угольных зерен заключено между металлической или угольной пластинкой, образующей мембрану (или прикрепленной к мембране) и массивным, неподвижным куском угля, лежащим сзади. Когда мембрана подвергается давлению, то она сжимает угольные зерна и увеличивает их проводимость, в результате чего батарея дает больший ток через микрофон и телефон; звук воспроизводится в этом случае благодаря изменениям давления. В микрофоне „пуговичного“ типа (button type)¹⁾ угольные зерна, наоборот, заключены в легкую металлическую коробочку или капсулу, прикрытую маленькой мембраной, и вся эта система укрепляется на большой мембране; колебания этой мембраны приводят в движение всю капсулу целиком и увлекают вместе с ней угольные зерна, которые подвергаются при этом давлению благодаря возникающим силам инерции. В данном случае изменения сопротивления микрофона вызываются движениями или смещениями мембраны.

Обычный тип простого гидрофона показан на рис. 1 схематически; его фотография приведена на рисунке 18. Он состоит из тяжелого футляра в форме круглого полого диска; внутренняя полость закрыта металлической мембраной, в центре которой укреплен маленький „пуговичный“ микрофон. Этот гидрофон очень чувствителен, но не обладает направленным действием.

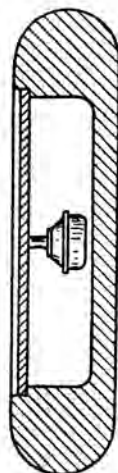


Рис. 1.

НАПРАВЛЕННЫЙ ПРИЕМ И ПЕРЕДАЧА.

Задача направленной передачи и приема при акустической сигнализации является весьма важной. При акустической передаче, как и при радиотелефонии и телеграфии, большое затруднение состоит в том, что звуковые волны, как и электромагнитные, стремятся распространиться более или менее равномерно во всех направлениях, в результате чего их интенсивность быстро падает, согласно закону обратной пропорциональности квадрату расстояния; кроме того, всегда

¹⁾ Название вызвано сходством этого микрофона с большой пуговицей.

возможно мешающее действие различных станций, и не обеспечена секретность передачи. При приеме даже чувствительный аппарат, открывающий наличие звука на больших расстояниях, имеет относительно малую цену, если он не дает указаний о направлении или положении источника звука. Это показывает, что вопрос о направленной передаче и приеме имеет столь же важное значение, как и вопрос конструирования мощных передатчиков и чувствительных приемников. Поэтому ясно, что направленная передача и прием являются предметом исключительного внимания.

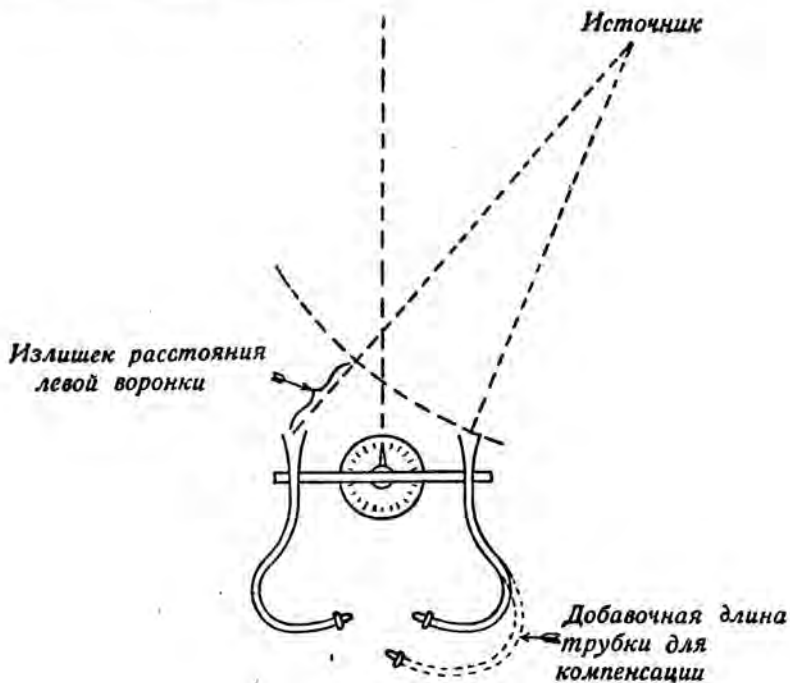


Рис. 2.

Бинауральный или двуухный способ направленного слушания. — Наши уши представляют собою чрезвычайно совершенную систему направленного приема. Когда мы слышим внезапный шум, мы инстинктивно оборачиваемся в направлении звука, и если бы мы были слепы, то все-таки сумели бы со значительной степенью точности определять направление по звуку. Эта способность обусловлена тем, что два наших уха расположены на противоположных сторонах головы на расстоянии около 15 см друг от друга, и звук достигает одного уха скорее, чем другого, если только источник звука не находится в плоскости, перпендикулярной к линии, соединяющей оба уха, т.е. спереди, сзади или сверху. Наши уши чрезвычайно чувствительны к ничтожной разности времени, и так как промежуток

времени зависит от направления, становясь тем длинней, чем больше сбоку лежит источник, то мы способны определять направление удивительно точно, конечно, если оба уха одинаково чувствительны. Это свойство ушей лежит в основе так называемого двуушного метода определения направления, разработанного как для воздушного, так и для подводного приема. Например, если укрепить две воронки (рис. 2) на горизонтальной планке и от каждой из них провести к уху резиновую трубку определенной длины, то мы сможем обнаружить и определить направление аэроплана по шуму его мотора со значительной точностью, так как воронки усиливают звук, а чувствительность определения направления может быть увеличена увеличением расстояния между воронками. Когда слышится звук и наблюдатель вращает планку, несущую воронки в направлении, указанном стрелкой, то при этом ему кажется, что источник звука переходит от одного уха по направлению к другому и, наконец, устанавливается сзади головы. Это положение называется положением двуушного равновесия, и когда такое равновесие достигнуто, планка будет стоять под прямым углом к направлению на источник звука.

Тот же принцип, конечно, можно применить и для подводного слушания посредством двух приемников, но в этом случае, принимая во внимание, что скорость звука в воде в четыре с половиной раза больше, чем в воздухе, расстояние между приемниками придется увеличить в том же отношении, чтобы получить ту же разность времени и, следовательно, одинаковое различие направлений при помощи двух ушей. Эти соображения заставляют применять довольно большое расстояние между двумя приемниками, и вращение их под водой становится затруднительным; для обхода этого затруднения при определении направления применяется так называемый двуушный компенсатор.

Возвращаясь к нашей паре воронок на рис. 2, предположим, что источник звука находится направо от средней плоскости, и что трубы от воронок сделаны неодинаковой, а разной длины, с таким расчетом, чтобы добавочная длина трубки от правой воронки была равна излишку расстояния от источников звука до левой воронки. Ясно, что в этом случае запоздание звука при достижении более далекой левой воронки уравнивается добавочным запаздыванием, получающимся

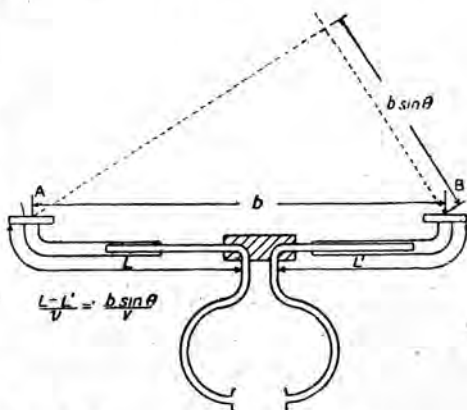


Рис. 3. Двуушный метод с выпрямляющим компенсатором.

благодаря увеличению длины трубки между правой воронкой и ухом, и, несмотря на то, что источник звука лежит сбоку от средней плоскости, двуушное равновесие будет иметь место. Таким образом, направление источника звука можно определить и при неподвижном положении двух приемников, вводя добавочное приспособление, позволяющее изменять длину слуховой трубки. Такое приспособление именуется двуушным компенсатором; наиболее простая форма его изображена на рис. 3. Две равные трубки от приемников подведены к двум концам длинной прямой трубки AB , состоящей из трех частей, из коих средняя может вдвигаться больше в ту или другую из крайних. Средняя часть трубки

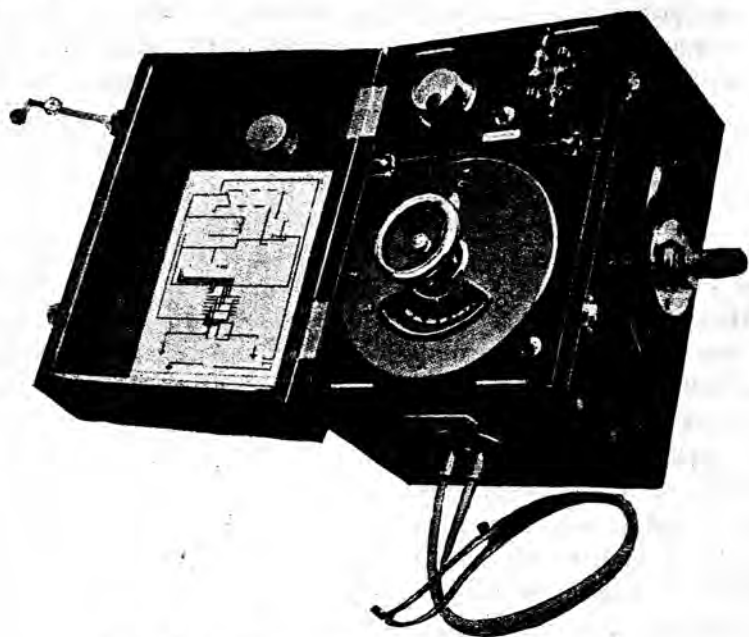


Рис. 4 а. Американский компенсатор. Общий вид.

в центре разорвана и через отводящие резиновые трубки равной длины соединена с правым и левым ухом. Когда центральная часть трубки находится в среднем положении—пути звука до обоих ушей равны, и двуушное равновесие получается, только если источник звука лежит в средней плоскости; если источник лежит вправо от средней плоскости так, что звук достигает правой воронки раньше, то, передвигая центральную часть трубки налево, мы увеличим путь звука от правой воронки и уменьшим путь от левой и можем восстановить равновесие. Если аппарат снабдить специально рассчитанной шкалой, то по отсчету делений шкалы можно сразу получить направление источника звука; оно находится из отношения $2d = b \cdot \sin \theta$, или $\sin \theta = \frac{2d}{b}$, где b —расстояние

между воронками, d — смещение центральной трубки из среднего положения, а θ — угол между направлением на источник звука и средней плоскостью.

В целях наибольшего удобства при определении направления по этому методу, американской фирмой Automatic Telephone Company сконструирован круговой компенсатор. На рис. 4а показан общий вид этого компенсатора, на рис. 4б — пояснена его конструкция. В неподвижной круглой пластине вырезаны две concentрические круговые канавки, которые при закрывании сверху второй пластиной превращаются в два круговых хода. Верхняя пластинка может вращаться относительно неподвижной нижней; она снабжена двумя заслонками, которые разделяют круговые канавки на две не сообщающиеся части, но в то же время в заслонке устроены перекрестные ходы, устанавливающие сообщение между внутренней и наружной частью канавки как с правой, так и с левой стороны. Звук от двух воронок, входя в два конца внешней канавки, проходит через них до заслонки, затем переходит по перекрестным ходам во внутреннюю канавку и проходит к ее концам, к которым прикреплены трубки, ведущие к ушам. Очевидно, что при вращении верхней пластины разность путей звука меняется на величину в четыре раза большую, чем расстояние, на которое продвинута заслонка; положение стрелки на шкале указывает непосредственно направление на источник звука.

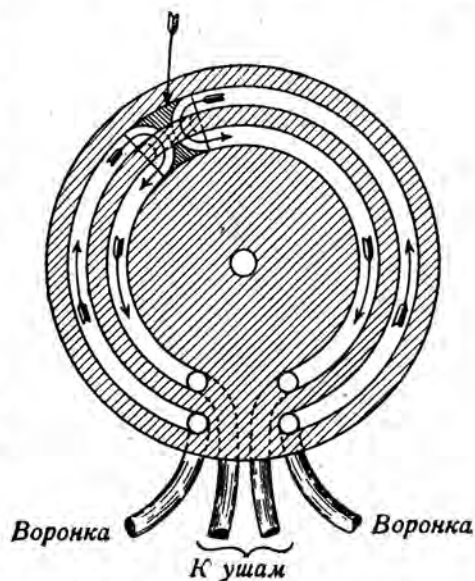


Рис. 4б. Принцип устройства американского компенсатора.

Двуушный метод имеет очень важное значение, и далее мы увидим многочисленные его применения, почему мы и остановились так подробно на описании метода. Однако, существуют другие методы направленного приема, о которых также необходимо упомянуть.

Метод суммы и разности. — В случае электрических приемников двуушный метод может быть заменен так называемым методом суммы и разности. Предположим, что наши две воронки на планке заменены двумя обычными, совершенно одинаковыми микрофонными приемниками (рис. 5.) M_1 , и M_2 , и что эти приемники соединены с двумя телефонными трансформаторами T_1 , и T_2 , вторичные обмотки которых могут быть соединены последовательно. Очевидно, что если

источник звука лежит в средней плоскости, то-есть звук достигает обоих приемников одновременно, то они будут одинаково возбуждены и дадут одинаковые электродвижущие силы во вторичных обмотках трансформаторов. Если вторичные обмотки соединены так, что электродвижущие силы действуют в одном направлении, то в телефоне получится громкий звук, но если их переключить так, чтобы электродвижущие силы были противоположно направлены, то в телефоне получится молчание. Если такое положение приемников найдено, а затем источник будет перемещаться в ту или другую сторону от средней плоскости, то звук будет достигать приемников в разное время и полного отсутствия звуков в телефоне не будет получаться; звук

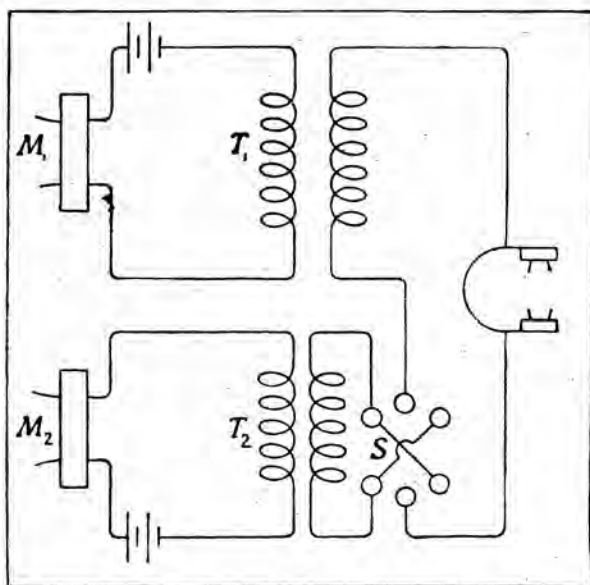


Рис. 5.

от источника будет тем громче, чем дальше он лежит от средней плоскости. Поворачивая планку с приемниками до полного исчезновения звука или, по крайней мере, до минимума звука, можно найти направление источника звука так же, как и в двуушном методе; в том случае, когда электродвижущие силы имеют одинаковое направление и звук лежит в средней плоскости, мы получим максимум звука, а при повороте планки — ослабление его.

Этот метод суммы и разности имеет преимущество перед двуушным методом, так как различная чувствительность ушей наблюдателя может весьма значительно влиять на способность определять направление. Поэтому многие наблюдатели предпочитают второй метод. Но, с другой стороны, этот метод снова заставляет ввести вращение системы приемников или ввести компенсатор между двумя системами приемников, что вносит нежелательное осложнение. Однако, в некоторых случаях метод суммы и разности в применении к электрическим приемникам имеет громадное значение, так как он позволяет устранить затруднение, которое необходимо преодолеть, прежде чем применять приемники для двуушного определения направления. Ясно, что для получения отсутствия звука в телефоне при включении на разность электродвижущих сил необходимым условием является полная одинаковость дей-

ствия обоих приемников, но этого весьма трудно добиться, применяя обычные микрофоны, так как их мембраны сильно отличаются одна от другой. Действительно, если два таких приемника поместить рядом друг с другом и принимать ими один и тот же звук, то очень часто оказывается, что приемники дают лишь небольшую разницу при включении на сумму и разность электродвижущих сил; ясно, что такие приемники не годятся для двушного метода, который требует полной одинаковости приемников. Заменяя обычные угольные или металлические мембраны каучуковыми, можно добиться гораздо большей одинаковости, и, чтобы выбрать подходящие парные приемники для двушного метода или для метода суммы и разности, их необходимо предварительно испытать в лаборатории, для чего метод суммы и разности весьма пригоден.

Направленные приемники.— Уже было указано, что изменение давления в акустическом луче не имеет направленного характера, но смещения среды происходят в направлении распространения, что позволяет посредством приемника смещений определять направление звука. Этот принцип в действительности почти не применялся для направленного приема, но Смит (B. S. Smith) разработал приемник смещений, состоящий из маленькой полый сферы, содержащей внутри магнетофон и имеющей нейтральную плавучесть в воде. Такая сфера колеблется так, как будто бы она была частью воды и, следовательно, оказывает наибольшее влияние на магнетофон, когда

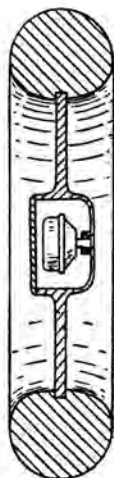


Рис. 6.

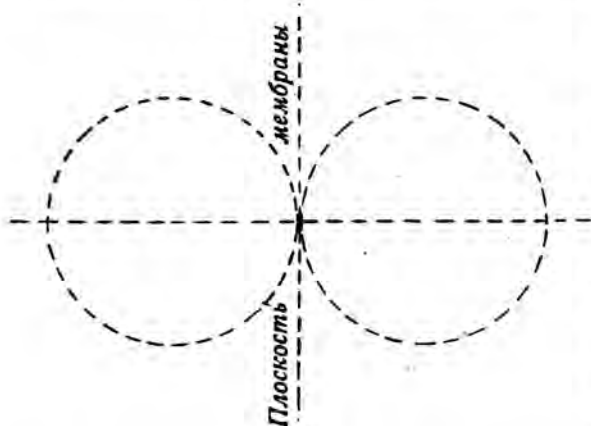


Рис. 7.

его ось расположена в направлении распространения, и не оказывает влияния вовсе, когда его ось перпендикулярна к этому направлению.

Наиболее употребительная форма направленного приемника, изображенная на рис. 6 и 7, принадлежит к типу уравновешенных гидрофонов. Такой гидрофон подобен по устройству н-

направленным гидрофонам (рис. 1), за исключением того, что вместо массивной полый металлической коробки он имеет только массивное латунное кольцо с мембраной в середине, в центре которой устроена полость, заключающая „пугочный“ микрофон. Ясно, что если поместить такой гидрофон так,

чтобы его плоскость лежала в направлении распространения звука, то обе стороны мембраны будут подвергаться равным и одновременным давлениям, и в результате мембрана останется неподвижной;

наблюдатель не услышит звука. Если же повернуть гидрофон плоскостью к источнику, то задняя сторона будет экранирована телом гидрофона, звук дойдет до нее позже и с меньшей силой, чем до передней, так что в результате получится определенное давление на мембрану. Таким образом, при поворачивании такого гидрофона вокруг оси звук будет иметь минимум, когда плоскость гидрофона направлена на источник, и будет достигать максимума при повороте на прямой угол; сила звука при различных углах поворота показана на полярной диаграмме рис. 7. Подобный же эффект дает направленный гидрофон Морис — Сайкса (Morris—Sykes), изображенный на рис. 8; он имеет с двух сторон две одинаковые мембраны, соединенные в центре стерженьком, на котором укреплен микрофон. Когда гидрофон установлен ребром к звуку, на обе мембраны получаются одинаковые давления, стремящиеся переместить их в противоположных направлениях, в результате чего стерженек с микрофоном останется в покое и наблюдатель ничего не услышит.

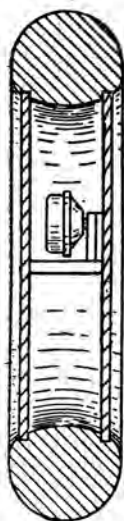


Рис. 8.

Описанные типы направленных гидрофонов действуют вполне удовлетворительно, так как дают очень резкий минимум звука, но они не вполне выполняют требование направленности, так как очевидно, что минимум звука будет получаться одинаково, каким бы ребром мы ни поворачивали гидрофон к источнику звука; таким образом, источник звука можно предполагать в том или другом из двух диамет-

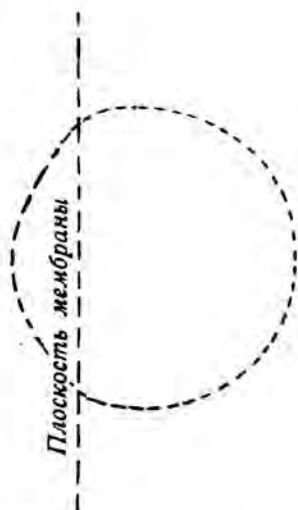
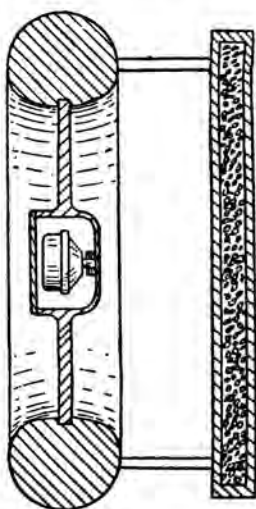


Рис. 9.

трально противоположных направлений. Из-за этого свойства такие аппараты называют гидрофонами двухсторонними (duolateral); но оказывается, что эту трудность можно обойти и превратить гидрофон двухсторонний в гидрофон односторонний (unilateral), поместив

в нескольких дюймах с одной стороны от аппарата „ложную стенку“, показанную на рис. 9. Эта стенка может быть сделана из нескольких слоев дерева или металла или иметь полость, наполненную дробью, и имеет назначение защищать от звука заднюю стенку гидрофона. Подобный гидрофон дает максимум звука, когда незащищенная сторона повернута к источнику, и минимум звука, когда она повернута от источника; сила получаемого в разных направлениях звука изображена на полярной диаграмме, которая ясно показывает, что при определении направления не может быть ошибки на 180, почему этот аппарат и именуется односторонним гидрофоном. Такой гидрофон, однако, не дает столь точного определения направления, как гидрофон двухсторонний, обладающий очень резким минимумом, и потому выгоднее всего связать оба гидрофона в пару, поставив их под прямым углом друг к другу на одной и той же вертикальной штанге. Когда двухсторонний гидрофон дает минимум звука, — односторонний дает максимум, и мы можем определить направление источника однозначно и чрезвычайно точно.

Кроме описанных методов направленного приема, есть и другие; упомянем метод Мезона и Пирса (Mazon and Pierce), основанный на принципе акустического накапливания, открытого А. В. Портером (A. W. Porter); в этом методе для приема применяется большая плоская поверхность; далее будет описан прибор Вальзера (Walser), в котором звук собирается в фокус посредством чечевицеобразного приспособления.

Что касается направленных передатчиков, то прежде всего следует вспомнить об общем принципе, применимом ко всякого рода излучениям, а именно, что передача и прием являются взаимно обратными процессами; хороший приемник является также хорошим передатчиком, направленный приемник можно превратить в направленный передатчик с тем же распределением интенсивности излучения по разным направлениям. Например, если вместо того, чтобы слушать посредством двух воронок, соединенных равными трубками с ушами, мы поднесем эти трубки к мощному источнику звука, чтобы звук выходил из двух воронок совершенно так же, как он ими раньше воспринимался, то наблюдатель, помещающийся в средней плоскости, услышит громкий звук; по мере удаления от средней плоскости в ту и другую сторону звук будет казаться ему слабей. Подобным же образом, приводя в колебания мембрану одностороннего гидрофона, мы получим излучение звука, главным образом, в одном направлении. Обобщая этот принцип, мы можем сказать, что возможно послать в определенном желаемом направлении луч звука.

КОНСТРУКЦИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ И ПРИЕМНИКОВ.

Теперь мы обратимся к описанию приборов, применяемых на практике для подводной сигнализации и остановимся отдельно на а) передатчиках, б) приемниках и в) приборах для направленной работы.

Подводные передатчики или источники звука.

Простейшую форму подводного передатчика представляет из себя подводный колокол, который уже издавна применяется как подсобное средство при навигации. Первоначально он был сконструирован Эдмондсом (H. Edmunds) в 1878 г., но на практике в навигацию серьезно был применен только в 1898 г., когда А. Мендей (A. J. Munday) и профессор Елисей Грей (Elisha Gray) образовали общество Gray Telephone Company (1899) и стали применять колокол, ударяемый под водой, и телефонный приемник для подводной сигна-

лизации. После смерти Грея в 1901 г. работу продолжал Мендей, образовавший о-во Submarine Signal Co. После многочисленных проб был выработан тип колокола, изображенный на рис. 10. Он состоит из бронзового колокола, весом 100 кг и имеющего в воде высоту тона 1215 с^{-1} ; колокол ударяется молотком, приводимым в действие сжатым воздухом. Для подвода сжатого и отвода отработавшего воздуха применяется двойной рукав; удары молотка регулируются посредством особого клапана, состоящего из небольшой перепонки, направляющей сильный поток воздуха в ударный механизм. Этот род колоколов обычно применяется на пловучих маяках, при чем его просто спускают за борт на глубину 5—6 метров. На маяках, где можно применить электрический ток, употребляется подобный же колокол, приводимый в действие электрическим механизмом; он подвешивается на треножной опоре, имеющей высоту около 7 м и ширину около 6 м и

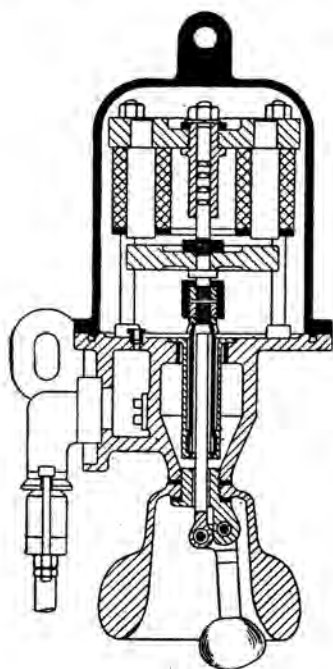


Рис. 10.

стоящей прямо на дне в удобном месте на расстоянии около километра или более от маяка. В этом случае молоток приводится в действие посредством круговой железной арматуры, притягиваемой шестью электромагнитами, сидящими на общем сердечнике; полюса покрыты медными чашками во избежание задержки под действием остаточного магнетизма. К колоколу проводится четырехжильный кабель; по двум проводам подводится ток в $3\frac{1}{2}$ ампера для приведения аппарата в действие, по двум другим проводится ток от телефонного аппарата, помещенного внутри механизма, что позволяет контролировать правильность работы аппарата, слушая его звук по телефону. Первый такой электрический

колокол был установлен около Яичного Утеса (Egg Rock) близ Бостонской гавани в Соединенных Штатах, а в настоящее время в работе находится большое количество как пневматических, так и электрических колоколов по берегам Великобритании и Америки.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕДАТЧИКИ.

В виду простоты обслуживания и контроля в настоящее время наиболее распространены электромагнитные передатчики; они изготавливаются в больших размерах и позволяют передавать сотни ватт акустической энергии. Их можно разделить на два класса: а) незатухающие передатчики и б) прерывистые или ударные передатчики, соответственно незатухающим и искровым передатчикам в беспроводной телеграфии.

а) Незатухающие электромагнитные передатчики.— Во всех таких передатчиках применяется переменный ток, имеющий частоту, соответствующую собственному периоду колебательной системы, и этот ток применяется или для возбуждения электромагнита с расщепленным сердечником, который действует на мембрану, или же пропускается через катушку, прикрепленную к мембране и находящуюся в сильном постоянном магнитном поле, в результате чего развиваются переменные силы, приводящие мембрану в колебание. Эти два типа можно назвать передатчиками с „подвижным железным сердечником“ и передатчиками с „подвижной катушкой“, по аналогии с соответственными типами электромагнитных измерительных приборов.

Передатчики с подвижным сердечником разработаны, главным образом, в Германии; рис. 11 представляет один из наиболее распространенных типов, сконструированных фирмой Signalgesellschaft in Kiel. Мембрана *D* снабжена в центре утолщением, к которому прикрепена отливка, соединенная с расщепленным железным сердечником *C* в форме буквы *E*, находящимся почти в соприкосновении со вторым, лежащим над ним расщепленным сердечником *C'* такой же формы.

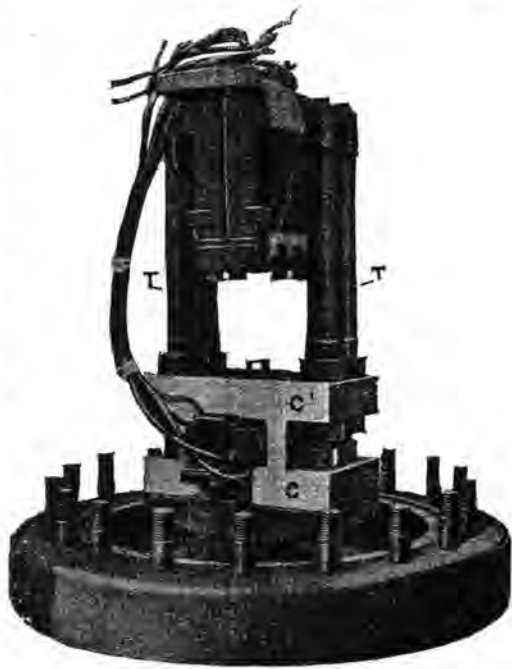


Рис. 11.

Возбуждающая катушка надета на внутреннюю ветвь ярма, как в обычного типа трансформаторах, и производит сильное притяжение двух половин ярма при каждом прохождении тока в том или другом направлении. Таким образом, частота колебаний механической силы вдвое больше частоты тока. Верхняя половина ярма не укреплена неподвижно, она связана с нижней частью посредством четырех вертикальных стальных труб T со стальными стержнями внутри, при чем длина этих труб и стержней подобрана так, что собственный период их продольных колебаний равен собственному периоду мембраны. Мембрана привинчивается болтами к конической оболочке, в которой имеются отверстия для ввода кабеля внутрь. Передатчик этого типа весит около 5 кг и имеет мембрану диаметром около 45 см; он излучает акустическую мощность от 300 до 400 ватт с коэффициентом механического полезного действия порядка 50 %.

Серьезное возражение против передатчиков с подвижным сердечником вызывает свойственный им низкий электрический коэффициент полезного действия, обусловливаемый их большой самоиндукцией, что влечет необходимость большого безваттного возбуждающего тока. Дело можно улучшить, применяя большой конденсатор параллельно или последовательно с возбуждающей катушкой, но это не вполне удовлетворительный выход.

В виду этого второй тип передатчика, с подвижной катушкой, часто предпочитается, особенно в Америке; принцип его устройства понятен из рис. 12. Катушка проволоки, по которой протекает переменный ток, прикреплена непосредственно к мембране; она движется благодаря тому, что находится в сильном постоянном поле, образованном в круговом вырезе „горшкообразного“ электромагнита, возбуждаемого постоянным током. Этот тип

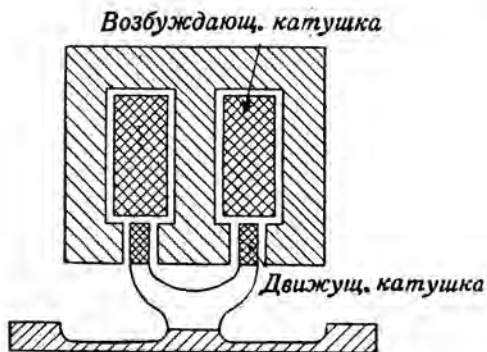


Рис. 12.

имеет относительно малую самоиндукцию и потому высокий коэффициент полезного действия; конструкция его представляет некоторые механические трудности, так как катушка проволоки не представляет твердого тела и потому способна вызвать большое затухание и потери.

Эта трудность очень изящно побеждена Фессенденом в Америке, и его передатчик является, вероятно, самым экономичным и мощным из всех электромагнитных передатчиков. Принцип устройства этого передатчика совершенно тот же, но вместо того, чтобы прикреплять катушку непосредственно к мембране, чтобы она двигалась вместе

с нею, Фессенден применяет неподвижную катушку, которая индуцирует токи в сплошном медном цилиндре, как во вторичной обмотке трансформатора, и этот медный цилиндр уже прикреплен к мембране. Рис. 13 изображает сечение передатчика Фессендена, в котором электромагнит постоянного тока устроен двухполюсным; он охватывает медный цилиндр, прикрепленный к мембране. Переменный ток протекает по неподвижной катушке, намотанной на внутренний железный сердечник, при чем катушка в двух своих половинах намотана в противоположные стороны, соответственно разным полюсам магнита; эта катушка наводит мощные токи в медном цилиндре, и эти токи, пересекая сильное поле магнита, вызывают электродинамические силы, направленные по оси цилиндра и имеющие ту же частоту, что и питающий переменный ток. Такое устройство является в механическом отношении очень жестким; при резонансе с собственной частотой мембраны, которая обычно делает 1050 $\varnothing$, получается большая мощность и коэффициент полезного действия. Передатчики этого типа дают акустическое излучение 500 ватт и более и могут передавать сигналы под водой на расстоянии до 500 км. Знаки Морзе можно передавать любым из этих передатчиков посредством соответственного ключа.

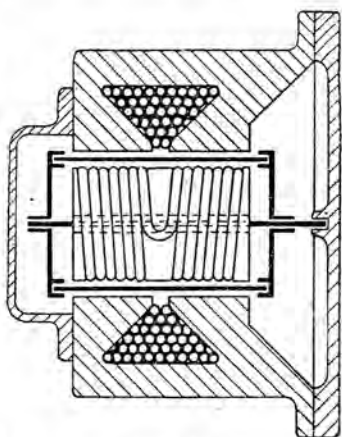


Рис. 13.

б) Прерывистые или ударные передатчики. — Мы уже упоминали о подводных колоколах, которые представляют прототип прерывистого подводного передатчика и которые можно приводить в действие электрическим путем. Еще более простой тип ударного передатчика представляет собою ударный источник звука с мембраной, сконструированной Б. Смитом; он имеет перед колоколом то преимущество, что ударный механизм целиком лежит внутри аппарата, ни одна часть его не работает в воде. Рис. 14 дает разрез такого прибора; он снабжен обычной стальной мембраной с тяжелой массой в центре, по которой ударяет молоток. Этот молоток втягивается при прохождении постоянного тока через возбуждающую катушку, преодолевая силу спиральной пружины, а при внезапном перерыве тока пружина толкает молоток, который дает мембране одиночный резкий удар, а затем отскакивает и оставляет ее свободно колебаться. Таким способом получается ряд очень мощных звуковых колебаний, хотя он длится очень недолго благодаря большому затуханию мембраны в воде.

Аналогичный мощный ударный передатчик можно приводить в действие пневматически сжатым воздухом с частотой ударов около

сотни в секунду; этот тип передатчика можно употреблять для сигнализации по азбуке Морзе, применяя особый пневматический ключ.

Для целей акустического определения глубин автором был специально сконструирован простой передатчик, который сообщает воде ряд отдельных импульсов, не создавая ритмических колебаний. Здесь эластичная мембрана совершенно устранена и заменена квадратной расслоенной пластиной, которая притягивается к магниту с расслоенным сердечником в форме буквы *Е*, питаемому постоянным током, проходящим по катушке, надетой на среднюю ветвь ярма. Сила притяжения составляет $\frac{B^2}{8\pi}$ дин на квадратный сантиметр, где *B*—магнитная

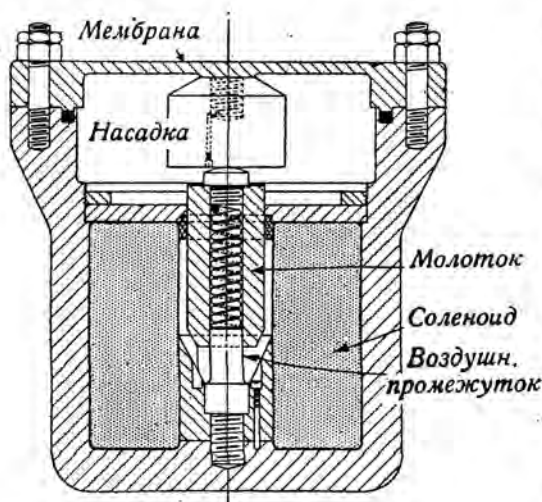


Рис. 14.

индукция в гауссах; таким образом, если $B=15000$, то сила получается около 14 кг на квадратный сантиметр, что дает при площади полюса в 140 см, силу около 2 тонн. Чтобы передать эту силу воде, наконечники полюсов и пластина снабжены канавками и в них положены полоски каучука, сжимающиеся при притяжении магнитом. При включении электромагнита к сети с напряжением в 100 вольт ток возрастает относительно медленно в виду большой самоиндукции, и пластина ме-

дленно притягивается, но при внезапном обрыве тока реакция каучуковых прокладок толкает пластину с начальной силой около 2-х тонн и сообщает воде одиночный резкий удар, подобный взрыву. Действие этого передатчика будет объяснено в связи с вопросами акустического определения глубин.

Подводные сирены.

В Англии и Германии был предложен целый ряд разного рода подводных сирен значительной мощности; во всех них имеется пластина или диск, через отверстие которого прогоняется вода, приводящая диск во вращение. Придавая отверстиям известные размеры, всегда можно, конечно, заставить воду вращать диск, но этот способ не удобен с точки зрения сигнализации, так как получающееся постепенное увеличение скорости производит изменение высоты звука.

В виду этого обычно вращают диск независимо, с постоянной скоростью, посредством электрического мотора, а сигнализация осуществляется включением и выключением струи воды, нагнетаемой высоким давлением. Однако, сирены не вошли в широкое употребление, так как электромагнитные передатчики гораздо удобнее, поэтому мы не останавливаемся на сиренах подробнее. Имеется еще много других форм акустических передатчиков, но вышеописанные применяются для акустической сигнализации и ударной передачи почти повсюду. Для целей звуковой разведки часто применяются небольшие взрывы.

ПРИЕМНИК ИЛИ ГИДРОФОНЫ.

С-ТРУБКА.

Первым и самым простым подводным акустическим приемником следует считать уже упомянутую трубку Брока с мембраной, натянутой поперек ее нижнего отверстия. Американцы улучшили этот прибор, заменив мембрану толстостенным резиновым баллоном или плоской подушкой и назвали ее, в честь д-ра Кулиджа (Coolidge) — ее изобретателя, С-трубкой; она изображена на рис. 15. Трубка эта очень чувствительна, но количество звуковой энергии, сообщаемой воздуху внутри баллона, в силу изложенного выше принципа перехода звука из одной среды в другую, оказывается чрезвычайно малым, что заставляет наблюдателя слушать через возможно короткую трубку и делает этот способ не особенно удобным.

Американцы первые оценили чувствительность и удобство применения микрофонов; они помещают микрофоны в полых резиновых баллонах и употребляют комбинацию из 3-х таких баллонов, подвешенных на треножной раме, для направленного приема. На рис. 16 изображена двойная С-трубка, для двуушного приема. Как уже было разъяснено, слушание двумя ушами от двух разных приемников позволяет найти направление источника звука, но очевидно, что при этом допустима всегда ошибка на 180, как и в двустороннем гидрофоне, так как источники, расположенные симметрично относительно линии, соединяющей два

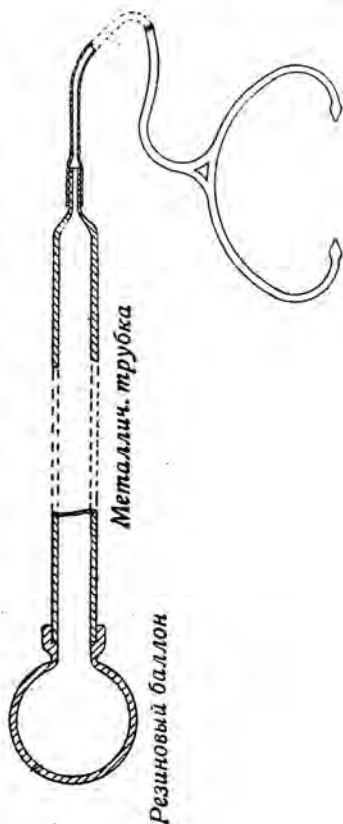


Рис. 15.

гидрофона, дадут ту же разницу ходов звуковой волны. Употребляя три приемника, расположенные по углам равностороннего треугольника и слушая в них по очереди попарно, можно определить направление совершенно точно. Микрофоны, употребляемые для этих целей, должны быть предварительно подобраны по методу суммы и разности.

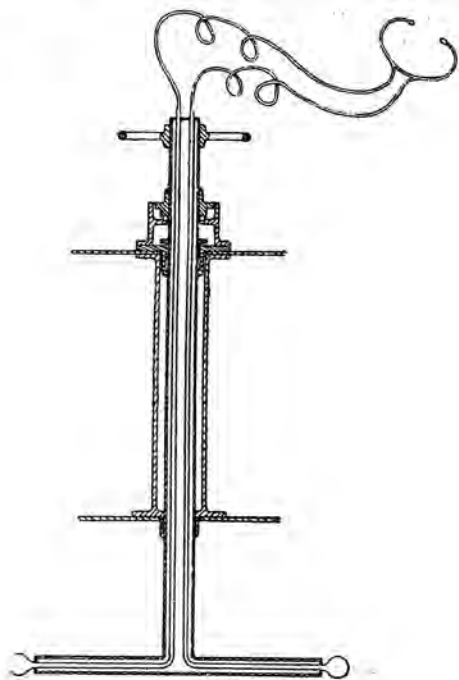


Рис. 16.

МАГНЕТОФОНЫ.

Магнетофоны менее чувствительны, чем микрофоны, но для подводного приема имеют преимущество, так как они свободны от капризов угольных микрофонов и их гораздо легче подобрать в пару для двушного метода. Так как малую чувствительность легко компенсировать посредством современных усилителей с катодными лампами, которые нельзя применять с микрофонами из-за шума, вызываемого угольными зернами, то аппарат,

снабженный магнетофонами, может быть сделан столь же чувствительным. Передатчик Фессендена можно применить как мощный

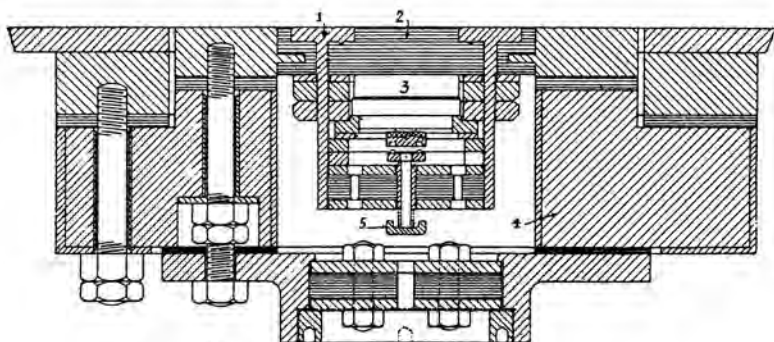


Рис. 17.

магнетофонный приемник, возбуждив его электромагнит и слушая на катушку, через которую при передаче пропускается переменный ток; он обычно и применяется как приемник при сигнализации, что

удобно еще и в том отношении, что мембраны всех передатчиков одного типа настраиваются на один и тот же тон. Однако, эта резкая настройка делает такой аппарат неприменимым для приема двух сигналов.

Одним из наиболее чувствительных магнетофонных устройств для приема на кораблях является магнетофон Смита (рис. 17). Он состоит из массивной свинцовой оболочки (4), прикрепляемой к борту судна, в которую вставлена толстая резиновая мембрана (2), соприкасающаяся

с водой. Непосредственно сзади

этой мембраны укрепляется обычный брауновский телефон (3)¹⁾, так что звук, прошедший

через резиновую мембрану в

воздух внутри аппарата, при-

водит мембрану и связанный

с ней язычок телефона в коле-

бания и вызывает индуктиро-

ванные токи в катушках. Этот

тип приемника в соединении

с трехламповым усилителем и

высокоомным телефоном дает

великолепное воспроизведение

обычных звуков; если четыре

таких приемника укрепить по-

парно спереди и сзади на кор-

пусе судна, то экранирующее

действие корпуса позволит

определять направление ис-

точника по относительной ин-

тенсивности звука в 4 прием-

никах — для удобства аппарат

снабжается 4-полюсным пере-

ключателем между приемни-

ками и усилителем. Шумы корабля значительно ослабляются прикре-

плением свинцовой оболочки приемника к пластинкам с резиновыми

втулками; большая инерция свинцового кольца (4) препятствует вос-

приятию шумов, исходящих от корпуса судна.

Описанные формы подводных приемников являются наиболее

употребительными на практике.



Рис. 18.

¹⁾ В этом телефоне ток, проходящий по катушкам поляризованного магнита, притягивает упругий железный язычок, который скреплен с легкой алюминиевой мембраной, приводимой в колебания.

Конструкция гидрофонов.

На рис. 18 изображена простейшая форма ненаправленного гидрофона, схема которого была дана на рис. 1; в нем массивный полый бронзовый корпус снабжен с одной стороны мембраной, в центре которой укреплен микрофон с „массивной опорой“ (рис. 19 представляет двухсторонний гидрофон с двумя мембранами, схематически изображенный на рис. 8).

Для того, чтобы иметь возможность слушать во время хода корабля и чтобы уменьшить насколько возможно шум корабля и движения

воды, гидрофоны с резиновым баллоном, или других более сложных типов, заключаются внутрь рыбообразных тел и буксируются в воде на некотором расстоянии за кормой; для двустороннего слушания применяется комбинация из нескольких таких тел. Но в настоящее время стремятся, однако, поместить приемный аппарат на борту, вводя хорошую акустическую изоляцию от корпуса.

В Германии широко применяется способ приема посредством резервуаров с водой, укрепленных внутри судна, впервые введенный фирмой Submarine Signal Co. Рис. 20 показывает расположение двух таких резервуаров с гидрофонами внутри. При этой системе избегаются большие потери звука при отражении на границе воды и воздуха, как было выше указано.



Рис. 19.

Чрезвычайно интересная и чувствительная форма направленного приемного аппарата сконструирована лейтенантом французского флота. Вальзером; в нем звук собирается в фокусе, как в камера-обскуре, и по положению этого фокуса определяется направление. Для этой цели к корпусу корабля приделывается заплата („пластырь“), представляющая из себя стальной щит со сферической кривизной, диаметром около 1,1 м; часть его видна на рис. 21. Этот щит имеет боль-

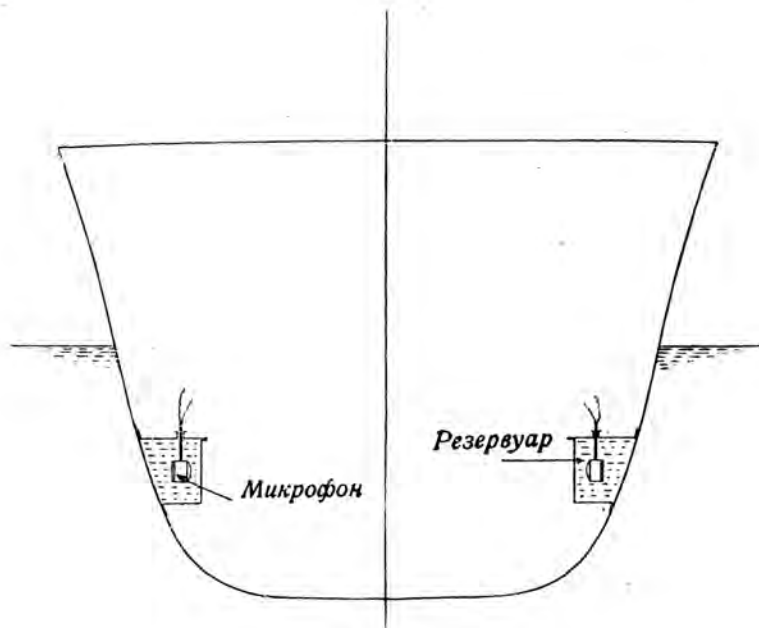


Рис. 20.

шое количество отверстий *B*, которые закрыты тонкими стальными мембранами *C*. Все эти мембраны, расположенные на сферической поверхности, собирают звук и направляют его в фокус, лежащий на расстоянии 1,5 м. Для улавливания звука служит воронка *D*, с присоединенной к ней слуховой трубкой, вращающаяся на рычаге вокруг вертикальной оси, так что она может перемещаться для отыскивания фокуса и определять направление источника звука. Обычно устраивают 2 таких аппарата с обеих сторон судна в передней его части, и наблюдатель располагается между ними, вставив слуховые трубки от

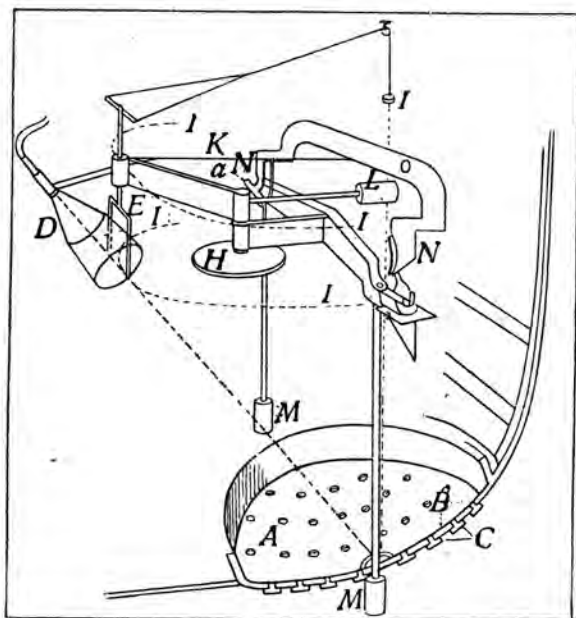


Рис. 21.

двух воронок в уши; таким образом он может следить за положением источника как с той, так и с другой стороны и определить направление по шкале.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ.

Звукометрия.

Одной из самых важных акустических задач во время войны была звуковая разведка для определения местоположения орудий и подводных взрывов. Имеется два метода определения местоположения, которые можно охарактеризовать названиями: метода „нескольких станций“ и метода „радио-акустики“; из них применялся на войне только первый (несмотря на меньшее удобство), так как он не требует совместного действия передатчика и приемника.

Звукометрия по методу нескольких станций. — Метод нескольких станций основывается на том, что звуковые волны распространяются сферически от источника звука, как от центра. Если поместить 3 или более приемника на окружности, описанной из источника звука как из центра, то звук достигнет всех приемников одновременно; таким образом, если сигналы на всех приемниках получены в один и тот же момент, то следует заключить, что источник лежит в центре круга, проходящего чрез приемники. Но когда источник лежит в каком-либо другом положении, то сигналы будут приняты

в различные моменты и, измерив разность времен приема на разных станциях, можно установить положение источника вычислением или графически.

Простая схема рис. 22 поясняет этот метод. Пусть точки A, B, C, D обозначают 4 приемника, лежащие в точно определенных пунктах, а P — источник звука, положение которого надо определить. Проведем окружность с центром в P через приемник A ; очевидно, что когда звук достиг A , то он должен пройти еще расстояние bB , чтобы достичь приемника B и расстояния cC и dD до приемников C и D . Таким образом, звук придет в B, C и D на промежуток времени

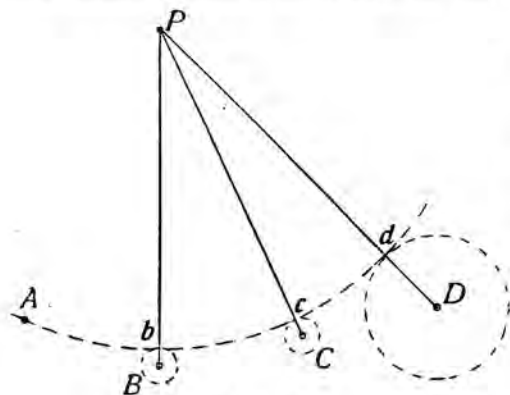


Рис. 22.

видно, что когда звук достиг A , то он должен пройти еще расстояние bB , чтобы достичь приемника B и расстояния cC и dD до приемников C и D . Таким образом, звук придет в B, C и D на промежуток времени

$$t_1 = \frac{bB}{v}, \quad t_2 = \frac{cC}{v} \quad \text{и} \quad t_3 = \frac{dD}{v}$$

позднее, чем в *A*. Измерив промежутки времени t_1 , t_2 и t_3 и умножив их на скорость звука, мы получим перпендикулярные расстояния приемников *B*, *C* и *D* от круга, имеющего центр в *P* и проходящего через ближайший к нему приемник *A*. Если описать вокруг *B*, *C* и *D* окружности радиусами, представляющими в некотором масштабе расстояния bB , cC и dD , и затем провести окружность, касающуюся трех описанных, то центр ее будет определять положение источника звука *P*. Для определения промежутков времени на войне почти всюду применялся многострунный гальванометр Эйнтговена; четыре струны его соединяются с четырьмя микрофонами или гидрофонами, а пятая — с электрическими часами или камертоном прерывателем, чтобы давать точную шкалу времени. Изображение струн фокусируется на ленте бромистой бумаги, которая протягивается посредством мотора сперва через камеру гальванометра, а затем через проявляющую и фиксирующую ванну, и выходит из аппарата готовая для промывания и просушки; нужные отсчеты можно произвести немедленно после появления ленты. Чтобы облегчить отсчеты интервалов времени, перед источником света заставляют вращаться, посредством „фонического мотора“, синхронного с камертоном, колесо с толстыми и тонкими спицами, вследствие чего поперек бумаги получается ряд линий на расстоянии десятых и сотых долей секунды.

Рис. 23 представляет репродукцию записи звукометрической станции такого рода, на которой зарегистрирован прием от 4 приемников; на рис. 24 представлена Эйнтговеновская камера для записи. Приемники, примененные в этом случае, были простые микрофоны, укрепленные на мембранах, повернутых к водонепроницаемым резервуарам, которые подвешивались на треножниках, стоящих на дне моря в точно определенных пунктах; микрофоны были соединены кабелями с наблюдательной станцией.

В виду важности звукометрии, как средства для определения местоположения корабля во время тумана, было сделано много усилий



Рис. 23.

для дальнейшего улучшения метода и для исключения фотографического аппарата. Большое усовершенствование в этом направлении было сделано А. Б. Вудом и Дж. М. Фордом (J. M. Ford) на опытной станции адмиралтейства. Они предложили прибор, — который можно назвать „фоническим хронометром“, показывающий промежутки времени непосредственно на шкале с точностью до тысячной доли секунды. Принцип устройства этого прибора очень прост и понятен из рис. 25. На вертикальной оси вращается с постоянной скоростью 150 оборотов в минуту особый мотор, питаемый током от камертонного прерывателя, дающего 25 ω в секунду; на вершине его оси помещен круглый сосуд, содержащий ртуть, которая предназначена для поддержания постоянства скорости вращения; сосуд снабжен ободком, который вместе с ним вращается вокруг оси. Вокруг этого диска располагается

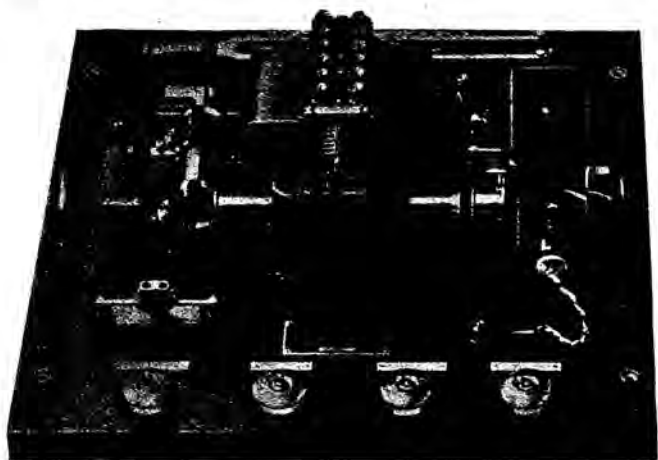


Рис. 24.

известное число записывающих механизмов (на рис. 25 их три); каждый из них представляет собою легкое алюминиевое колесико, укрепленное на вертикальной оси, ободок которого находится на расстоянии сотых долей миллиметра от вращающегося диска. Ось этого колесика может быть притянута внутрь посредством электромагнита, и тогда алюминиевое колесико приходит в соприкосновение с вращающимся диском и начинает вращаться со скоростью 10 оборотов в секунду; каждый из электромагнитов снабжен двумя одинаковыми и противоположными по направлению обмотками; при пропускании тока в обе обмотки, равно как и при отсутствии тока, электромагнит не действует, а при пропускании тока в одну из обмоток он притягивает ось малого колесика внутрь. К оси алюминиевых колесиков прикреплен легкий алюминиевый указатель, который вращается по шкале, имеющей сто делений; таким образом, каждое деление соответствует одной тысячной

доле секунды; два других указателя, связанные с осью зубчатой передачей, указывают более длинные промежутки времени до 10 секунд.

Для применения при звукометрии, обмотки электромагнитов хронометра соединяются с гидрофонами по особой схеме. В данном случае гидрофон состоит из диафрагмы с точечным контактом, который замыкается под действием звука и остается разомкнутым, пока не будет снова замкнут специальным приспособлением. Можно применить четыре гидрофона; тогда схема составляется так, что первый гидрофон сразу разрывает цепи одной половины обмоток всех электромагнитов и пускает в ход все хронометры одновременно, а когда звук достигает следующих гидрофонов, то разрывает вторую обмотку соответствующего электромагнита, после чего колесико хронометра отходит от диска и действием тормоза немедленно останавливается. Таким образом, три циферблата покажут нам промежутки времени между моментом прибытия звука к первому гидрофону и к каждому из трех других. Одна тысячная секунды соответствует в морской воде расстоянию около 1,5 м; по найденным величинам легко построить чертеж согласно рис. 21 и определить положение источника звука.



Рис. 25.

Для быстрого определения местоположения автор предложил прибор, который был назван звукометрическим локатором. Подобное же приспособление предложено Дадуряном в Америке¹⁾.

Корабль, желающий определить свое местоположение во время тумана, вызывает по радио ближайшую звукометрическую станцию, которая предлагает ему произвести взрыв подводного заряда. По записи посредством Эйнтговенской камеры или отсчетов фонического хронометра, местоположение корабля определяется по карте и сообщается ему по радио.

Звукометрия по методу радио-акустики. — Этот метод предложен проф. Джоли и, вероятно, будет иметь громадное значение в мореплавании; до сих пор этот метод был мало разработан, так как

¹⁾ Н. Dadourian. Phys. Rev. August, 1919.

он имел малое значение в военной обстановке. В опыте Колладона и Штурма в 1826 г. скорость звука в воде была определена посредством одновременного удара по подводному колоколу и вспышки пороха в воздухе. Зная расстояние между источником звука и наблюдателем и промежуток времени между вспышкой и звуком колокола, легко высчитать скорость звука в воде, считая, что свет распространяется мгновенно. Обратно, если известен промежуток времени и скорость звука, то можно вычислить расстояние, как это делают,

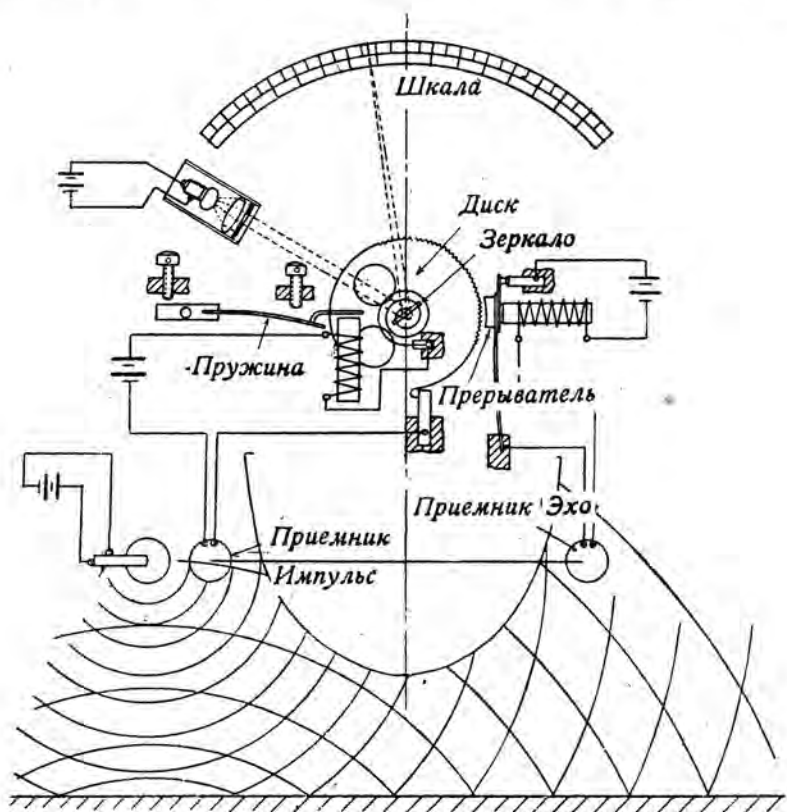


Рис. 26.

например, для определения расстояния молнии, измеряя промежуток времени между вспышкой молнии и ударом грома. Преимущество подводного метода заключается, во-первых, в малой поглощаемости звука в воде и, во-вторых, в отсутствии водяных течений, подобных ветру, которые могли бы заметно повлиять на скорость звука.

К несчастью, вспышка света не может быть применена во время тумана, но вместо этого можно применить радиотелеграфные сигналы, на которые туман мало влияет и которые распространяются с той же скоростью, как и свет. На маяке или в другом определенном пункте

производится одновременно подводный взрыв и короткий радиосигнал, и корабль, снабженный приемной радиостанцией и направленным гидрофоном, может определить расстояние от маяка, измеряя интервал времени между радиосигналом и звуком взрыва. Так как скорость звука в морской воде приблизительно 1,5 км в секунду, то расстояние можно определить с точностью до $\frac{1}{3}$ км посредством простого секундомера, а направление станции найти или направленным гидрофоном, или радиогониометром, не устанавливая связи корабля со станцией. Если маяк или маячное судно время от времени посылает радиосигналы и одновременно производит удары подводного колокола, то все находящиеся по соседству корабли могут, при каждом таком сигнале, определить свое положение, пользуясь направленным гидрофоном, а если одновременно слышны сигналы двух станций, то это становится возможно и без направленных гидрофонов. Успехи определения направления посредством радиогониометрии сделали применение звукометрии в навигации менее важным, но надо сказать, что определение направления по радио иногда не применимо, например, при восходе и закате солнца; кроме того, на стальных судах радиогониометрия дает значительные ошибки в определении направления по причине сильного влияния массы корабля на фронт электромагнитной волны. Так как пользование гидрофонами на судах входит все в большее употребление для целей подводной сигнализации и др., то возможность применения радио-акустического метода для определения положения является фактом большого значения.

КАБЕЛЬ-ПИЛОТ.

Это приспособление, строго говоря, не имеет отношения к акустике, но о нем следует упомянуть в нескольких словах, как о вспомогательном средстве для направления судов в туманную погоду в гаванях и каналах. В данном случае корабль должен идти по совершенно определенному пути шириною всего в несколько метров, и звукометрические методы, очевидно, непригодны. Для устройства кабель-пилота по морскому дну по желаемому направлению прокладывается кабель, по которому пускается ток звуковой частоты 500∞ ; корабль снабжается „искательной“ катушкой, связанной с усилителем и телефоном; если корабль идет достаточно близко к кабелю, то магнитное поле кабеля возбуждает в катушке переменную электродвижущую силу и дает звуки в телефоне. Устраивая две наклонные катушки по обе стороны корпуса железного или стального корабля, нашли, что звук оказывается более громким, когда телефон соединен с катушкой более близкой к кабелю, так что корабль может держать путь вдоль кабеля и держаться на совершенно определенном расстоянии с одной стороны от него. Корабли, идущие навстречу друг другу, таким образом, не рис-

куют столкнуться. Эта идея была впервые предложена Стефенсоном в Эдинбурге в 1893 г. и была вновь выдвинута во время войны капитаном Мэзоном. Способ кабеля-пилота в настоящее время вошел в употребление как в Англии, так и в Америке. От Саутгемптонской гавани до Спитхеда и далее в море адмиралтейством проложен кабель-пилот длиной в 27 км.

Акустическое определение глубин.

Другое чисто-акустическое приспособление, обещающее значительную помощь в мореплавании, это — звуковой метод определения глубин посредством отражения (эхо) от дна. Если корабль производит взрыв близ поверхности, то звук распространяется вниз и, отразившись от дна, может быть услышан как эхо; каждая секунда промежутка времени между взрывом и эхо соответствует глубине, равной половине скорости звука, то-есть около 750 метров. В этом направлении работали: Марти — во Франции, Бем — в Германии и офицеры американского флота и получили весьма точные результаты. Применяемый аппарат состоит из хронографа большой скорости, который отмечает промежуток времени между взрывом детонатора или другого небольшого заряда под кораблем и приемом эхо, отраженного от дна. Метод Бема разработан фирмой Аншютц, которая выпускает аппараты под названием „Эхолод“, дающие прекрасные результаты и позволяющие определить глубину с точностью до 0,3 м на полном ходу корабля и при волнении. Источником звука служит взрыв детонатора, вырабатываемого пневматически и запаливаемого нажимом ключа, когда он отойдет на расстояние нескольких футов от корпуса. На другой стороне корпуса, защищенный им от прямого действия взрыва, устанавливается приемник, который состоит из обычного угольного микрофона, замыкающего время, отмечающее приспособление, схематически показанное на рис. 26; оно рассчитано на регистрацию малых промежутков времени с точностью до тысячных долей секунды и состоит из диска, вращающегося на оси, который приводится ключом в нулевое положение и удерживается в нем, против силы пружины, посредством притяжения электромагнитом. В момент взрыва цепь электромагнита разрывается, и диск получает толчок от пружины и начинает равномерно вращаться; под действием звука, принятого микрофоном к диску, прижимается тормоз и останавливает его. Угол поворота диска, таким образом, пропорционален промежутку времени между нажатием запального ключа и возвращением эхо; легкое зеркальце на оси диска направляет луч света на прозрачную шкалу, разделенную непосредственно на глубины, и позволяет сразу отсчитать искомую глубину. Весь аппарат может работать от нескольких сухих элементов. Опыт показал, что скала с поверхностью в 2 м² уже дает

достаточно сильное эхо и аппарат может ее обнаружить. Бем начал свои исследования в 1912 г., и фирма Аншютца усовершенствовала его аппарат до 1920 г., когда он оставил работу в фирме.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОСРЕДСТВОМ ЭХО КОРАБЛЕЙ И ПРЕПЯТСТВИЙ.

Посредством звукометрии, кабелей-пилотов и измерения глубин звуком навигация во время тумана может быть сделана гораздо безопасней и правильней, но все же остается большая опасность столкновения в открытом море между судами и возможность натолкнуться на скалы, ледяные горы и обломки кораблей. Что касается кораблей, то имеется возможность уменьшить опасность посредством сигнализации сиренами, но благодаря неожиданным отражениям и преломлениям звука в тумане всегда имеется источник для ошибок и опасности. Подводная сигнализация устраняет эти трудности почти целиком, и по мере введения гидрофонных устройств риск столкновений между кораблями в движении становится все меньше. Хорошим приемным гидрофоном с направленным приемом обычный пароход может быть легко обнаружен и направление его определено по шуму его машин на расстоянии до нескольких километров. Но в случае скал, ледяных гор и обломков, которые не издают никаких звуков, единственным способом обнаружения во время тумана является использование эхо. К несчастью, эхо от небольшой скалы или корабля на порядочном расстоянии слишком слабо и легко может быть смешано с эхом от дна. Однако, Фесседеу, посредством его мощного электромагнитного передатчика удалось еще в 1916 г. получить эхо от отдаленных предметов; направленные передатчики и приемники позволяют усилить эхо, уменьшить мешающие звуки и определить направление и приблизительное расстояние искомого предмета. Метод обнаружения опасных препятствий посредством эхо был предложен еще в 1912 г., вскоре после гибели „Титаника“, Л. Ричардсоном, и можно надеяться, что этот метод окончательно устранит последнюю из серьезных опасностей при мореплавании.

АКУСТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА МОЩНОСТЕЙ.

Прежде чем закончить наш обзор, необходимо еще указать на удивительные достижения М. Константинеско, которому удалось показать возможность использования акустической энергии для ряда механических задач. Для целей подводной сигнализации применяются количества акустической энергии хотя и больше по сравнению с тем, что понимали до сих пор под звуковой энергией, но все же редко превосходящие несколько сот ватт. Константинеско смело предугадал возможность передачи больших количеств энергии в воде посред-

ством переменных давлений, имеющих звуковую частоту. Уже много лет принято иллюстрировать явления переменных электрических токов посредством гидравлических аналогий, и автор настоящей статьи написал книгу, в которой подобные аналогии используются для построения полной теории вопроса; однако, пока Константинеско не высказал своей мысли о возможности передачи переменных давлений в воде для практических целей, эта идея никому не приходила в голову. Сейчас же, как только эта идея появилась, стало ясно, что вся теория происходящих процессов уже готова по аналогии с учением об электричестве. В поразительно короткое время Константинеско изобрел генераторы, моторы и трансформаторы, рассчитанные на большое количество мощности, передаваемой по гидравлическим трубам в форме акустических волн с частотой около 50ω . Генератор представляет собою простой бесклапанный насос высокого давления; аналогичным образом устроен и мотор. Применяя три поршня с кривошипами на 120° друг от друга, можно получить трехфазный акустический генератор и применить его для вращения мотора. Первое коммерческое использование аппараты Константинеско получили для целей сверления скал и клепания, для чего этот метод особенно подходит, так как здесь возможно применение простого поршня в цилиндрической обойме без всяких клапанов, передача же мощности происходит посредством особой формы гибкого гидравлического рукава, аналогичного электрическому кабелю. Не будет преувеличением сказать, что идеи Константинеско открывают совершенно новое поле для техники и их развитие может иметь очень важное значение.

ДОБАВЛЕНИЕ ¹⁾.

УЛЬТРА-ЗВУКОВАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ.

В последние годы техника подводной сигнализации обогатилась новыми аппаратами, работающими на совершенно ином принципе, чем прежние. Мы имеем в виду подводные кварцевые излучатели, предложенные французским физиком П. Ланжевром и разработанные им совместно с инженерами Флоренссоном, Марти и Тули ²⁾.

Кварцевый излучатель основан на пьезо-электрических свойствах этого вещества. Если из кристалла кварца вырезать тонкую пластинку (рис. 27) так, чтобы ее плоскость была параллельна оптической оси Z и была нормальна к бинарной или электрической оси X (таких осей в кристалле три) и, наложив на обе стороны такой пластинки метал-

¹⁾ Составлено переводчиком С. Н. Ржевским.

²⁾ La Nature. № 2572, 21 Jul. 1923 и № 2667, 16 Mai, 1925.

лические обкладки, подвергнуть ее сжатию или растяжению в направлении оси Y , то на обкладках появится электрический заряд.

$$Q = K \frac{\alpha}{l} P \text{ CGSE},$$

где α — длина пластинки параллельно оптической оси,

l — толщина пластинки,

p — действующая сила в кг,

k — пьезо-электрическая постоянная кварца $= 0,0677$.

При растяжении и сжатии знаки зарядов обратны, при сжатиях и растяжениях в направлении оси X .

Обратно при электризации обкладок получается изменение размеров кристалла (сжатие или растяжение в зависимости от знака электризации). Изменение размеров происходит как вдоль оси X , так и вдоль оси Y . По абсолютной величине изменения размеров кристалла очень малы, но развивающиеся силы весьма значительны.

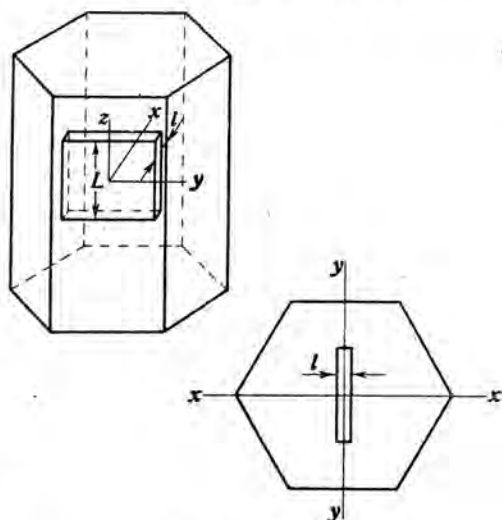


Рис. 27.

Если обкладки пластинки заряжаются переменным током, то кристалл начинает совершать упругие колебания; волны распространяются вдоль оси X и вдоль оси Y . При подходящих условиях колебания кристалла легко передаются в окружающую среду; при этом в воде излучение кварца гораздо интенсивнее, чем в воздухе, благодаря большой близости упругих свойств и вытекающему отсюда малому отражению на границе двух сред.

Наибольшую интенсивность упругих колебаний в кварце можно достичь в том случае, когда вдоль кристалла укладывается одна полу-волна упругого колебания (или вообще целое число полу-волн, как в органной открытой трубе или струне), и мы имеем резонанс возбуждающих колебаний с собственным периодом кристалла вдоль осей X или Y . Расчет показывает, что это может получиться лишь при очень высоких частотах, порядка сотен тысяч в секунду. Если кристалл зажат между толстыми металлическими пластинками, например, стальными, то в такой системе устанавливается более длинная стоячая волна. На практике оказалось удобным применять частоты от 40 000 до 100 000 колебаний в секунду.

Эти частоты лежат безусловно выше предела чувствительности уха, и потому их можно назвать ультра-звуковыми частотами. Обнаружение таких колебаний возможно путем превращения их в электрическую форму и последующего детектирования (выпрямления), подобно тому, как это делается в радиотелеграфии.

Применение высоких, ультра-звуковых частот связано, правда, с более значительным поглощением в воде, но зато позволяет использовать преимущество направленной передачи и концентрации пучка звука, благодаря чему возможно достичь очень большой дальности. Колебания низкой частоты расходятся от источника во все стороны в виде сферической волны, колебания же высокой частоты, имеющие длину волны меньшую, чем диаметр мембраны, излучаются в виде плоской волны, пучком в направлении нормали излучателя с очень малым расхождением.

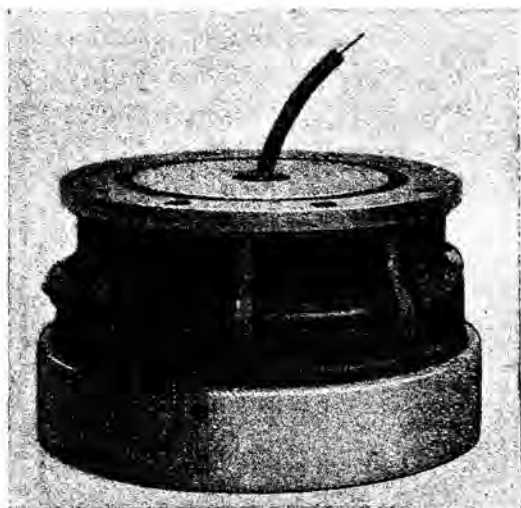


Рис. 28.

Мощный подводный излучатель Ланжевена состоит из множества кварцевых пластинок, уложенных в виде мозаики и зажатых между толстыми стальными дисками (рис. 28). Опыт показал, что такой излучатель в стальной оправе отдает в 625 раз больше энергии, чем один кварц без оправы, и позволяет достичь излучения мощностей в несколько сотен ватт.

Метод ультра-звуковой сигнализации применим для связи кораблей друг с другом и с берегами, для подводной телефонии (при помощи модуляции высокой частоты разговорным током) и для других целей.

Наиболее важное применение кварцевый излучатель нашел себе для определения глубин моря по методу эхо. Если t будет означать промежуток времени (в секундах) между посылкой короткого звукового сигнала и приходом эхо, отраженного от дна, то глубина моря равна

$$h = \frac{t \times 1480}{2} \text{ метров.}$$

Аппарат для определения глубин состоит из обычного искрового радио-передатчика, параллельно емкости колебательного контура которого включается кварцевый излучатель. При нажатии ключа передат-

чика излучатель посылает в воду серии звуковых волн высокой частоты, следующие друг за другом с тональной частотой.

В качестве приемника служит тот же кварцевый излучатель — под действием звука на его обкладках возникают заряды, и он возбуждает настроенный в резонанс электрический контур передатчика; колебания усиливаются и регистрируются автоматически на движущейся ленте.

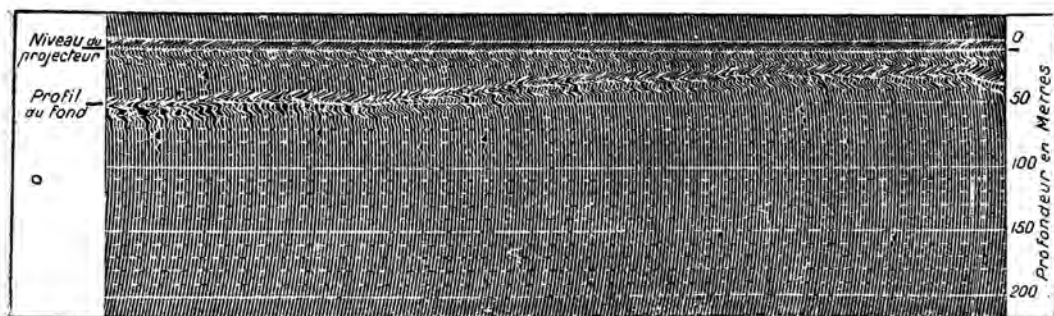


Рис. 29.

Записывая на ленте момент сигнала и момент эхо, возможно моментально и точно определить глубины моря под кораблем, а также расстояние подводных камней и др. препятствий. Существующие аппараты позволяют определять глубины от 5 м до 400 м. Большие глубины до 4000 м требуют более сильных излучателей, типы которых разрабатываются. Рис. 29 дает пример непрерывной записи глубин на ленте по мере движения корабля. Такая запись, очевидно, дает полную картину профиля морского дна и позволяет сделать эту работу с быстрой ходы судна.