

## ФИЗИКА ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

Г. П. Гарнвэлл \*)

Современная подводная лодка в действительности представляет ныряющую лодку. Большую часть времени она находится в надводном положении и способна погружаться только на определённый срок. Её очертания, заимствованные, как видно из рис. 1, от надводного корабля, обеспечивают ей устойчивость на поверхности воды. Она снабжена большим мостиком для навигации, имеет спаренные винты, дизельный мотор примерно на 6500 л. с. для надводного плавания и обычное оборудование радио, радара и сигнализации. Это обстоятельство очень важно, так как означает, что при проектировании подводных лодок приходится не только считаться с условиями подводного плавания, но и идти на множество компромиссов с требованиями плавания в надводном положении. После погружения водоизмещение лодки доходит до 1500 т, и по условиям работы она больше походит на самолёт или дирижабль, чем на надводный корабль. «Оторвавшись» от водной поверхности, она движется в трёх измерениях, и её вертикальное управление и устойчивость составляют предмет постоянной заботы. Всплытие и погружение её имеют много общих технических черт со взлётом и посадкой самолёта. Носовые и кормовые горизонтальные рули играют ту же роль при вертикальном маневрировании, как рули высоты и элероны. Механические повреждения представляют собой в том и другом случаях происшествия, влекущие за собой последствия, несравненно более тяжёлые, чем при передвижении по поверхности земли и воды.

Физика подводной лодки занимается главным образом различиями между физическими свойствами морской воды и воздуха, которые определяют глубокое различие между устройствами, предназначенными для движения в этих двух средах. Физические законы, разумеется, тождественны, но различия в химическом составе, плотности, сжимаемости и электропроводности так велики, что предъявляют совершенно различные требования к устройству и оборудованию.

---

\*) American Journal of Physics 16, № 3, 127—150 (1948). Сокращённый перевод М. Антокольского.

Работа в глубине моря для нас, привыкших жить, двигаться и общаться в воздухе, требует полного отрешения от всех навыков и представлений. Как только прозвучал сигнал погружения и волны сомкнулись над лодкой, она вступает в новый и непривычный мир.

Слегка увеличенное давление на уши говорит нам, что все отверстия герметически закрыты и при достаточном удалении от поверхности воды всякое ощущение движения утрачивается. В корпусе лодки нет ни одного окна, так как солнечный свет проникает лишь на очень малую глубину, и вода океана слишком мутна для пользования прожектором. Это напоминает полёт на самолёте в плотном тумане, с той разницей, что электрические моторы почти не производят шума. Все обычные средства контакта с внешним миром утрачены, и навигация и маневрирование являются «слепыми» и осуществляются при помощи остроумных приспособлений, специально изобретённых для подводных лодок.

Нежелание совершенно оторваться от среды, естественной для нас и наших механических устройств, а также тот факт, что непрозрачный океан уже при очень малом погружении даёт надёжное убежище, привели к смелому решению сохранить два надводных органа: перископ и «шнорхель». Перископ представляет собой триумф искусства оптиков, снабдивших подводника высококачественным телескопом, позволяющим ему обозревать поверхность воды и воздух над ним,

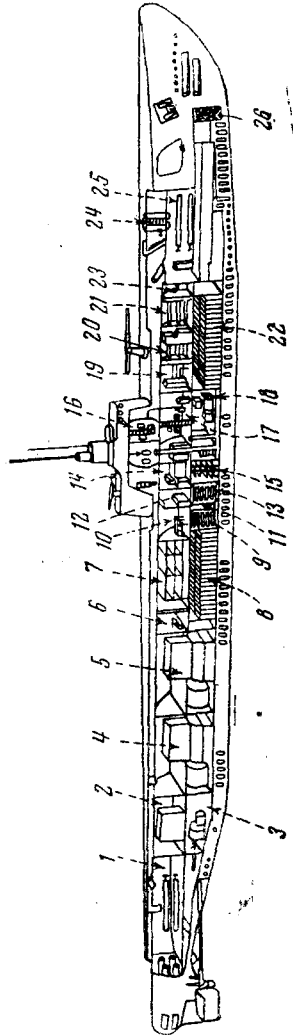


Рис. 1. Разрез типичной подводной лодки. 1 — кормовое торпедное помещение; 2 — рулевое помещение; 3 — помещение моторов; 4 — кормовое машинное отделение; 5 — переднее машинное отделение; 6 — умывальная и души для команды; 7 — кубрик; 8 — кормовая аккумуляторная; 9 — склад боеприпасов; 10 — матросская кают-компания; 11 — коридор; 12 — камбуз; 13 — склад боеприпасов; 14 — радиорубка; 15 — цейхауз; 16 — боевая вышка; 17 — командирский пост; 18 — носовая; 19 — каюта ст. унтер-офицера; 20 — офицерская каюта; 21 — офицерская кают-компания; 22 — носовая аккумуляторная; 23 — кладовая; 24 — спасательный люк; 25 — носовое торпедное отделение; 26 — ларь якорной цепи.

выставляя на несколько футов над водой трубку не больше дюйма в диаметре. Шнорхель, представляющий собой двойную всасывающую и выхлопную трубу дизеля, поднимается с крыши лодки, как рог улитки. Хотя он и обнаруживает лодку несколько в большей степени, чем перископ, он зато позволяет ей двигаться на дизелях, не расходуя батареи. Он возвышается лишь на несколько футов над поверхностью океана и снабжён пловучим затвором, предупреждающим попадание воды внутрь трубы при погружении последней под воду на волнении. Но эти два вспомогательных устройства, отражающих настойчивое желание заставить подводную

лодку оставаться надводным судном, не принадлежат к числу деталей, характеризующих собственно подводный корабль.

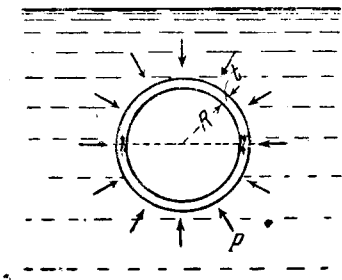


Рис. 2. Сжатие корпуса подводной лодки.

### ПЛОВУЧЕСТЬ И ВЕРТИКАЛЬНАЯ МАНЕВРЕННОСТЬ

Подводная лодка перемещается в среде, почти в 800 раз более плотной, чем воздух. Погружение на каждые 10 м добавляет одну атмосферу давления, так что на глубине 200 м избыток давления составляет около 20 кг/см<sup>2</sup>.

Прочному корпусу подводной лодки придаётся форма удлинённого эллипсоида с той целью, чтобы стальные пластины благодаря своей кривизне могли легче противостоять этому давлению. Если гидростатическое давление равно  $p$ , то сила на единицу длины, прижимающая друг к другу две половинки, разделённые на рис. 2 пунктирной линией, равна  $2Rp$ . Этому давлению должна противостоять стенка толщиной  $t$ , так что периферическое давление в последней составляет  $\frac{pR}{t}$ . Если диаметр лодки около 6 м, а толщина стенок — 3 см, то напряжение в стали в 100 раз превосходит давление воды. Таким образом, глубине в 200 м соответствует сжатие в стали, равное 200 кг/см<sup>2</sup>. Для получения достаточного запаса прочности требуется, таким образом, сталь с временным сопротивлением 10 000 кг/см<sup>2</sup>. Все отверстия и люки, приводящие к повышению напряжений, должны быть значительно усилены, и каждое лишнее отверстие в корпусе должно рассматриваться как крайне нежелательное.

Боевая рубка, остающаяся обитаемой и при погружении лодки, имеет форму цилиндра, параллельного её прочному корпусу, к верхней части которого она приварена, но короче его и меньше по диаметру. Так как радиус кривизны у рубки меньше, чем у корпуса, напряжения в стали, при той же толщине стенок, меньше. Трудность

Боевая рубка, остающаяся обитаемой и при погружении лодки, имеет форму цилиндра, параллельного её прочному корпусу, к верхней части которого она приварена, но короче его и меньше по диаметру. Так как радиус кривизны у рубки меньше, чем у корпуса, напряжения в стали, при той же толщине стенок, меньше. Трудность

изготовления и сварки стальных плит, имеющих толщину, превышающую несколько сантиметров, ограничивает диаметр корпуса, и для увеличения площади поперечного сечения лодки иногда прибегают к сварке вместе двух обычных корпусов, образующих поперечное сечение в виде восьмёрки.

Когда подводная лодка находится в движении, то кормовой и носовой рули придают ей маневренность, но её равновесие зависит от тщательного отрегулирования распределения тяжести. Надводный корабль имеет большой избыток пловучести и, вообще говоря, обладает большой вертикальной остойчивостью.

Напротив того, погружённая подводная лодка, хотя и не испытывает качки, но находится в неустойчивом равновесии, и только при определённом весе и строго зафиксированном его распределении удерживается на постоянной глубине и в правильном положении. Положительная пловучесть, необходимая для всплывания, осуществляется главной балластной цистерной, расположенной снаружи прочного корпуса, между ним и тонкой наружной обшивкой. Эти цистерны продуваются сжатым воздухом, выгоняющим воду через находящиеся в верхней части вентиляемые затворы, а заполняются для погружения—посредством открытия кингстонов вверху и внизу цистерн. Так как давление внутри цистерн всё время равно внешнему, то они не требуют конструктивного усиления. Совершенно независимая система уравнивания состоит из цистерн в носу, средней части и корме судна и служит для корректирования нейтральной пловучести, изменяющейся по мере расходования горючего, боеприпасов и прочих запасов и для поддержания правильного момента пловучести. Поддержание поперечной устойчивости не представляет особой трудности ввиду относительно коротких плеч у вращающихся сил, но в продольном направлении большая длина судна делает наклон киля весьма чувствительным к малым неравенствам в весе носа и кормы. Так как эти цистерны заполняются только частично, они должны противостоять наружному давлению. Самое уравнивание выполняется посредством набора или откачки воды или перекачки её из одной цистерны в другую.

Для наилучшего управления лодкой необходима почти нейтральная пловучесть, но соблюдение этого требования может оказаться довольно трудным, так как и объём вытесняемой воды и её плотность меняются с глубиной погружения. Как подводная лодка, так и вода сжимаемы и занимают на больших глубинах меньший объём. Точно так же и температура воды меняется с глубиной—обычно вода теплее вблизи поверхности—и тепловое расширение воды также оказывает влияние на пловучесть.

В предположении, что лодка находится в температурном равновесии с водой на заданной глубине, можно выполнить нижеследующий анализ проблемы равновесия. Полная погружающая сила  $F$  равна  $Mg - V\rho g$ , где  $M$ —масса лодки,  $V$ —её объём,  $\rho$ —плотность

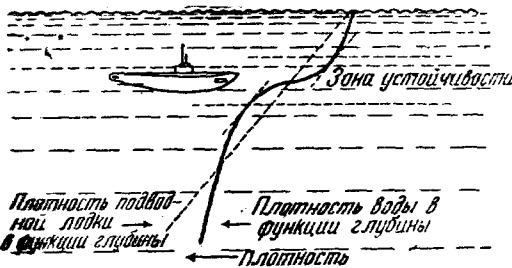
воды и  $g$  — ускорение силы тяжести. При равновесии эта сила должна равняться нулю, и для устойчивости равновесия необходимо, чтобы перемещение вверх вызывало увеличение этой силы, и наоборот. Направляя положительную ось  $x$  вниз в направлении  $F$  и вспоминая, что  $\rho$  и  $V$  суть функции  $x$  в силу их зависимости от давления  $p$  и температуры  $T$ , мы можем вычислить первую вариацию  $F$ . Так как

$$F = Mg - \rho V g,$$

то

$$\delta F = -(\rho \delta V + V \delta \rho) g = \left[ \rho \left( \frac{\partial V}{\partial p} \frac{dp}{dx} + \frac{\partial V}{\partial T} \frac{dT}{dx} \right) + \right. \\ \left. + V \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{dp}{dx} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{dT}{dx} \right) \right] g \delta x = - \left[ (\alpha_v - \alpha_l) \frac{dp}{dx} - (\beta_v - \beta_l) \frac{dT}{dx} \right] Mg \delta x.$$

Здесь  $\alpha = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p}$ ,  $\beta = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T}$ , а индексы «в» и «л» указывают соответственно на воду и подводную лодку. Для устойчивости равновесия выражение в скобках должно быть положительным, и так как  $\frac{dp}{dx} \cong \rho g$ ,



то условие устойчивости гласит:

$$(\alpha_v - \alpha_l) \rho g > (\beta_v - \beta_l) \frac{dT}{dx}.$$

При нулевом температурном градиенте это означает, что сжимаемость воды должна превышать сжимаемость лодки. Но это практически

Рис. 3. Уравновешивание подводной лодки.

недостижимо, так как  $\alpha_v \approx 5 \cdot 10^{-11} \text{дин}^{-1}$ , а  $\alpha_l$  для тонкого корпуса, как легко показать, равно приблизительно  $5 \cdot 10^{-10} \text{дин}^{-1}$ . Если нижние краны балластной цистерны открыты, то вода может входить в цистерну, сжимая в ней воздух, и мы получим весьма неустойчивое равновесие. Так как, кроме того,  $\beta_v > \beta_l$ , то  $\frac{dT}{dx}$  должно быть отрицательным и больше по абсолют-

ной величине, чем  $\rho g \frac{\alpha_v - \alpha_l}{\beta_v - \beta_l}$ . Внося типовые значения  $\beta_v \cong 10^{-3}$

и  $\beta_l \cong 4 \cdot 10^{-5} (\text{град. С})^{-1}$  и приведённые выше величины  $\alpha_v$  и  $\alpha_l$ , мы находим, что температурный градиент для устойчивого равновесия должен превышать примерно  $5 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$  на метр глубины. Подобные градиенты часто встречаются на глубинах, меньших 100 м, и в таких участках, получивших название «термоклин» (рис. 3), подводная лодка может сохранять устойчивое равновесие с неработающим двигателем. Ещё одно обстоятельство заслуживает упоминания —

это то, что плотность воды возрастает с её солёностью. Это может оказаться весьма опасным для подводной лодки, движущейся по направлению к речному устью: она может при отсутствии внимательного наблюдения за манометром внезапно оказаться на дне. Ввиду этого разнообразия факторов, влияющих на пловучесть, лодки снабжаются не только манометрами, указывающими глубину, но и самопишущими термометрами, а иногда также и измерителями солёности.

### ПРОДВИЖЕНИЕ ЛОДКИ И ЕЁ СКОРОСТЬ

Самым главным различием между воздухом и водой, с точки зрения самодвижущегося судна, является то, что только первый содержит необходимую компоненту для химической реакции, служащей источником энергии для движения. Самолёту для работы мотора на больших высотах может потребоваться применение компрессора, но пока он остаётся в земной атмосфере, он имеет кислород для сжигания горючего. Погружённая подводная лодка не располагает свободным кислородом, а иногда выдвигаемое предложение об электролитическом разложении воды и сжигании полученных кислорода и водорода противоречит принципу сохранения энергии. В силу этого у подводной лодки вся энергия, потребная для её передвижения, должна быть запасена в удобной форме.

Если энергия запасена в химической форме, то горючее может быть таким же, как у любого другого судна, но разница заключается в снабжении кислородом. Техника даёт две возможности решения этой задачи: сжатый кислород в баллонах и перекись водорода. Оба способа дороги и не вполне безопасны. Наиболее дешёвым и удобным горючим являются углеводороды, вследствие чего продуктом сгорания является углекислота, большое количество которой должно откачиваться из лодки против давления наружной воды, что значительно понижает коэффициент полезного действия. Таким образом, применение двигателей внутреннего сгорания представляет серьёзные трудности. Они частично разрешаются такими моторами, как двигатель Вальтера, хотя стоимость горючего чрезвычайно велика. Единственным практическим методом запасаения энергии для настоящего времени остаётся аккумуляторная батарея, обладающая по сравнению с химическими способами всеми преимуществами, за исключением только значительно меньшего удельного запаса энергии на 1 кг веса. Батарея имеет высокий коэффициент полезного действия, весьма безопасна при надлежащем размещении, развивает мало тепла, не даёт никакого шума, имеет относительно долгий срок службы и превращает энергию в механическую при помощи удобных двигателей. Вследствие этого батареи являются всеупотребительным источником энергии для лодок при подводном ходе, однако в противоположность, например, нефти, имеющей теплоту сгорания 10 *квт-ч/кг*, они запасают энергию лишь в количестве

0,1 квт-ч/кг. Поэтому лодка в надводном положении имеет продолжительность крейсирования, измеряемую месяцами, в подводном же положении она может перемещаться с заметной скоростью только в продолжение нескольких часов, после чего должна подняться на поверхность для зарядки аккумуляторов при помощи своих дизелей. Урановый высокотемпературный реактор может оказаться идеальным двигателем для подводных лодок, так как масса расходуемого вещества незначительна и не существует проблемы выхлопных газов. Однако таких двигателей пока не существует.

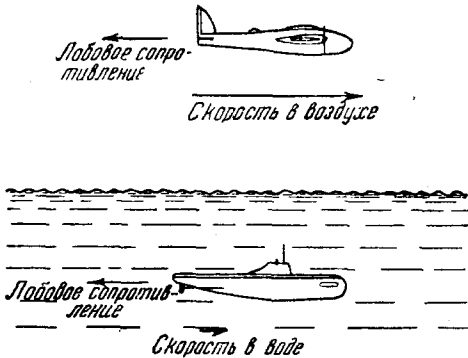


Рис. 4. Сопротивление жидкости.

Плотность воды является основным фактором, определяющим различие в скоростях, достигаемых самолётами и подводными лодками. Скорости, при которых существенное значение играют вязкие силы, лежат ниже скоростей подводных лодок. Силы, вызванные сжимаемостью, становятся существенными лишь при скоростях, сравнимых со скоростью звука. Этот эффект существен для самолётов, но не для подводных лодок, так как скорость звука в воде составляет около 1,5 км/сек. Для подводных лодок, как и для самолётов с дозвуковой скоростью, имеет место промежуточный случай, когда сила сопротивления связана с турбулентным движением жидкости. Сила этого происхождения зависит от плотности, скорости и линейных размеров движущегося тела (рис. 4). Количественно она пропорциональна величине  $arv^2$ , где  $a$  — коэффициент, характеризующий судно и называемый эффективной фронтальной площадью,  $v$  — скорость судна и  $\rho$  — плотность жидкости. Таким образом, для имеющих обтекаемую форму тел с одинаковой фронтальной площадью силы сопротивления пропорциональны плотности среды, в которой они движутся, и квадрату скорости.

Для воды и воздуха более показательным является сравнение по мощностям. Обозначая через  $P_c$  и  $P_d$  потребляемую мощность для самолёта и подводной лодки и вспоминая, что  $P = Fv$ , мы получим:

$$\frac{P_c}{P_d} = \frac{\rho_{\text{возд}} v_c^3}{\rho_{\text{вод}} v_d^3}$$

или

$$\frac{v_c}{v_d} = \left( \frac{P_c \rho_{\text{вод}}}{P_d \rho_{\text{возд}}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Таким образом, самолёт с мотором в 8000 л. с., как можно ожидать, будет перемещаться в 20 раз быстрее, чем лодка в 1000 л. с. в воде, в 1000 раз более плотной, чем воздух. Это иллюстрирует разницу между самолётом, делающим 300 миль в час, и 15 узлами хода подводной лодки. Очевидно, это фундаментальное обстоятельство ограничивает величину скоростей, достижимых для подводных лодок.

Интересно отметить, что один из источников сопротивления движению надводного судна отсутствует у подводных лодок — это поверхностная волна, расходящаяся при движении надводного судна от каждого его борта. Количество энергии, расходуемое на создание этой волны, весьма приближённо может быть вычислено следующим образом. Рассмотрим систему стоячих волн, изображённую на рис. 5 в момент максимума.

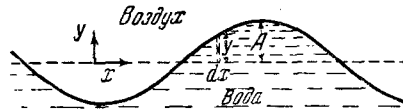


Рис. 5. Потенциальная энергия поверхностной волны.

Поверхность жидкости находится в этот момент в покое и, по предположению, имеет форму синусоиды. Количество энергии на единицу ширины и на длину, равную длине волны  $\lambda$  (в момент максимума вся энергия имеет форму потенциальной), даётся уравнением

$$\int_0^\lambda \rho g y dx \frac{1}{2} y = \frac{\lambda}{4\pi} \lambda g \rho \cdot \int_0^{2\pi} A'^2 \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} d\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = \frac{1}{4} \rho g \lambda A'^2,$$

где  $A'$  — амплитуда стоячей волны. Эту волну можно представить состоящей из двух бегущих волн амплитуды  $A = \frac{1}{2} A'$ , распространяющихся в противоположных направлениях. Отсюда энергия на единицу площади в бегущей волне равна  $\frac{1}{2} \rho g A^2$ . Таким образом, если волна, созданная кораблём, имеет амплитуду 1 м, ширину в направлении, нормальном к гребню, около 5 м и распространяется со скоростью в 10 м/сек, то мощность, необходимая для создания двух таких волн с каждой стороны от судна, примерно равна 700 л. с. Это составляет весьма значительную часть от общей мощности небольшого судна и заметно снижает его скорость. Но поверхностное возмущение экспоненциально падает с глубиной, так что это сопротивление отсутствует для достаточно погружённой подводной лодки. Таким образом, если судну придана хорошо обтекаемая форма, то при том же расходе мощности оно может двигаться в подводном положении быстрее, чем в надводном.

### ПОДВОДНЫЕ СРЕДСТВА СВЯЗИ

Быть может, наибольшая разница между существующими под водой и привычными для нас условиями заключается в мутности воды океанов и её непрозрачности для электромагнитных волн.



Большую часть наиболее точных сведений мы получаем при помощи зрения; между тем условия видимости под поверхностью воды весьма неблагоприятны. Обычный зелено-голубой цвет воды океанов соответствует наибольшей оптической прозрачности воды, но даже для таких участков максимальный радиус видимости не превышает не-

скольких сот футов. Интенсивный свет обнаруживается и на более далёком расстоянии, но при этом все детали становятся невидимыми, и обнаруживается лишь общее увеличение освещённости, подобно тому как видно солнце сквозь густой туман.

Применение радиосвязи и радара связано с вопросом о распространении более длинных волн электромагнитного спектра. Можно ожидать, что классическая электромагнитная теория окажется вполне пригодной при описании распространения этих волн, имеющих относительно низкую частоту. Электропроводность морской воды  $\sigma$  весьма велика, порядка  $5 \text{ мО/см}$ .

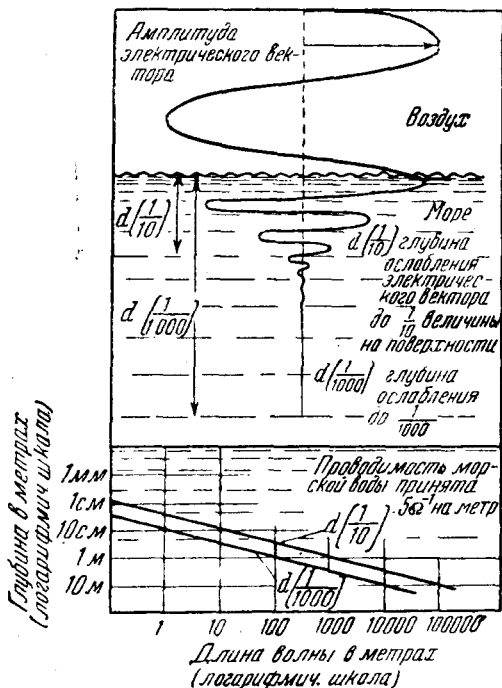


Рис. 6. Поглощение электромагнитных волн.

распространении в проводящей среде убывает экспоненциально, причём показатель степени при 10 равен  $14,6 \times \sqrt{\frac{\sigma}{\lambda_0}}$ , где  $x$  — пройденное расстояние и  $\lambda_0$  — длина в вакууме, оба выраженные в метрах. Таким образом, в морской воде амплитуда электрического или магнитного поля уменьшается в 10 раз на пути, составляющем 0,03 от квадратного корня из длины волны в вакууме, если длины выражены в метрах (рис. 6).

Фактор экспоненциального затухания настолько преобладает, что простейшие выводы могут быть сделаны без всякого учёта таких факторов, как угол падения радиации на поверхность моря и коэффициент отражения. Длинные радиоволны, скажем в 10 000 м, ослабляются в 10 раз на каждые 3 м пути. Допуская, что сигнал интен-

сивности, в тысячу раз меньшей, чем его интенсивность на поверхности воды, ещё может быть принят подводной лодкой, мы заключим, что её антенна может находиться на максимальной глубине 9 м. Важно отметить, что это относится к приёму сигнала, но отнюдь не к чему-нибудь напоминающему видение: такие радиоволны не могут быть применены для обнаружения контуров какого-либо объекта, имеющего размеры меньше чем несколько сот километров. Волны, употребляемые в радарах, в состоянии обнаружить предмет, имеющий размеры судна, но малое проникновение этих волн в воду делает их непригодными в случае подводных лодок. Интересно для полноты проверить, нельзя ли пользоваться электромагнитными волнами частоты более высокой, чем у видимого света. В области рентгеновых лучей,  $\gamma$ -лучей и космических лучей механизмами, обуславливающими поглощение энергии в пучке лучей, являются квантовые процессы фотоионизации, комптоновское рассеяние и рождение пар электрон-позитрон. Кривые поглощения в воде радиации с высокой энергией показывают, что коэффициент поглощения мало изменяется с энергией, однако он проходит через минимум при нескольких миллионах электрон-вольт. Но даже эта наиболее проникающая радиация ослабляется на одну десятую интенсивности на пути в 15 см. Таким образом, эта радиация также малопригодна для подводной связи или сигнализации.

Поскольку электромагнитные волны оказываются столь малопригодными для целей связи или навигации, единственной альтернативой для их замены оказывается звук. Для использования звука свойства чистой воды являются чрезвычайно благоприятными. Ослабление звуковых волн в воде много меньше, чем в воздухе. Теплопроводность и вязкость не в состоянии объяснить наблюдаемых величин коэффициента поглощения звука, и истинный механизм потери энергии остаётся ещё до некоторой степени тёмным\*). Однако ослабление интенсивности плоской звуковой волны может быть приближённо выражено эмпирической формулой  $10^{-10^{-12}x}$  для диапазона частот  $\nu$  от 50 до 50 000 пер/сек., где  $x$  выражено в метрах. Таким образом, звуковая волна в морской воде ослабевает до одной десятой интенсивности на пути  $x = 10^{12}\nu^{-2}$  м для  $\nu = 100$  пер/сек. Это весьма большое расстояние, и даже для  $\nu = 10^4$  пер/сек.  $x = 10$  км.

Отсюда следует, что поглощение играет весьма малую роль, за исключением самых высоких частот, и ослабление звуковых волн в воде вызвано в основном расхождением сферической волны от её источника. Скорость распространения звука в воде примерно в пять раз выше, чем в воздухе, дисперсия практически отсутствует и доплеровские эффекты, вызванные потоком в среде, незначительны, так как здесь совмещаются высокие скорости звука с обычно низкими скоростями течений.

\*) Обсуждение этого интересного вопроса см. у F. B. Fox and G. D. Rock. *Physical Review* 70, 68 (1946).

## АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОРЯ

Хотя, таким образом, звук представляет наилучшее средство для передачи информации под водой, его использование связано со всевозможными трудностями, и подводные лодки до настоящего времени принуждены действовать, располагая несравненно меньшим знанием обстановки, чем самолёты. В этом отношении различие столь же велико, как и в скорости. Некоторые из затруднений, с которыми связано использование звука, станут ясными из краткой характеристики акустических свойств моря.

Уравнение, выражающее смещение  $\xi$  частицы в одном измерении в идеально упругой среде, представляет собой уравнение движения плоской звуковой волны

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \rho \alpha \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2},$$

где  $t$  — время, а прочие обозначения были указаны выше. Решением этого уравнения служит любая функция вида  $f\left(t \pm \frac{x}{v}\right)$ , где  $v = \frac{1}{\sqrt{\rho \alpha}}$ . Исходя из вышеприведённых значений этих величин,  $v$  оказывается близким к 1500 м/сек. Это много ниже скорости электромагнитных волн, так что сведения об удалённых событиях заметно запаздывают. Уравнение непрерывности

$$\rho \alpha = \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

связывает давление и смещение. Амплитудное значение давления в волне ограничено приблизительно гидростатическим давлением вследствие появляющейся при отрицательных давлениях наклонности к кавитации. Это ограничивает интенсивность звуковой волны величиной  $\frac{1}{2} \rho^2 \sqrt{\frac{\alpha}{\rho}}$ . Вблизи поверхности воды, где  $\rho$  не намного превосходит атмосферное давление, интенсивность гармонической волны с большой длиной волны не может превзойти 1 вт/см<sup>2</sup>. При практически допустимой площади излучателя порядка 1 000 см<sup>2</sup> эта радиация весьма слаба по сравнению с мощными радиопередатчиками.

Интересно отметить, что отношение давления к скорости частичек в звуковой волне, известное под названием акустического импеданса, определяется формулой  $\sqrt{\frac{\rho}{\alpha}}$  или  $\rho v$ . Для воды эта величина составляет около  $1,5 \cdot 10^5$  дин сек/см<sup>3</sup>, а для воздуха — 36 дин сек/см<sup>3</sup>. Таким образом, звуковая волна в воде по сравнению с волной в воздухе характеризуется высокими давлениями и малыми смещениями. Это совершенно меняет характер микрофонов и излучателей. В них применяются магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи, так как они дают оптимальное соотношение импедансов и

вместе с тем наивыгоднейшие условия преобразования между электрической и акустической энергиями. По той же причине звук весьма слабо передаётся через поверхность вода — воздух: соотношение импедансов здесь так неблагоприятно, что не больше чем  $10^{-4}$  от интенсивности падающей волны переходит в другую среду. Таким образом, поверхность моря является почти идеальным отражателем звуковых волн; однако благодаря колеблющейся и неровной форме она даёт правильное отражение только при очень длинных волнах или косом падении.

Вблизи поверхности моря обычно присутствуют мелкие пузырьки. Они возникают вследствие волнения и других причин, как, например, движения судов при беспокойном море. Влияние, которое они оказывают на распространение звука, далеко не пропорционально малому объёму, который они занимают. Вода, содержащая небольшое количество малых пузырьков, по плотности мало отличается от чистой воды, но в силу того, что воздух в пузырьках легко сжимаем, величина  $\alpha$  в ней значительно выше. В самом деле, эффективное значение  $\alpha$ , как легко видеть, равно

$$\alpha_{\text{воды}} \left( 1 + \frac{\alpha_{\text{возд}} V_{\text{возд}}}{\alpha_{\text{воды}} V_{\text{воды}}} \right).$$

Если, например, один пузырёк диаметром в 1 мм приходится в среднем на 1 м<sup>3</sup> воды, то написанное выражение даёт для сжимаемости воды с таким содержанием пузырьков величину  $20 \alpha_{\text{воды}}$ ; здесь  $\alpha_{\text{возд}}$ , равное  $\frac{1}{p}$ , взято для глубины около 10 м. Это уменьшает скорость распространения примерно в 4,5 раза и приводит к значительному нарушению согласования импедансов как излучателей, так и приёмников. Пузырьки, животный и растительный планктон и рыбы действуют как рассеивающие центры для энергии, сконцентрированной в каком-либо ограниченном звуковом пучке. Океан содержит большое количество такого рассеивающего материала, а некоторые рыбы и ракообразные сами производят звуки вибрацией плавательного пузыря или щёлканьем клешней. Очевидно, что эти разнообразные факторы создают большие помехи при использовании звука для получения точной информации под водой.

Диффракционные явления в море отличаются от таких же явлений в воздухе только количественно. Так как длина волны в воде в 5 раз больше, чем в воздухе, то нужна в 5 раз более высокая частота, чтобы сохранить то же соотношение между длиной волны и линейными размерами приёмников, излучателей и прочего оборудования. В первом приближении пучок, даваемый излучателем, можно считать таким же, как диффракционный пучок, создаваемый плоской волной, проходящей через отверстие той же формы, как и поверхность излучателя или приёмника. Таким образом, интенсивность излучаемого

звука или чувствительность приёмника в разных направлениях уменьшается с увеличением угла, образованного с центральной осью, и достигает минимума при угле  $\theta$ , определяемом для квадратного отверстия, линейная апертура которого в плоскости  $\theta$  равна  $d$ , равенством  $d \sin \theta = \lambda$ . При дальнейшем возрастании угла имеют место

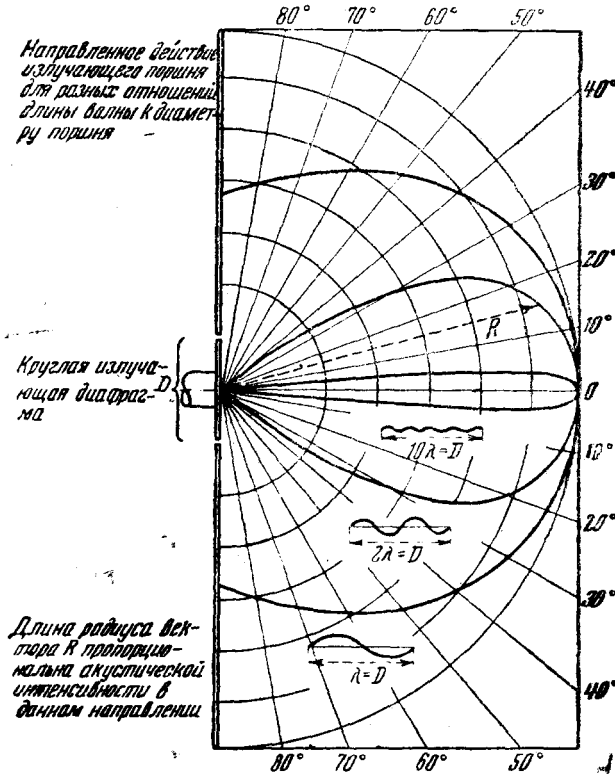


Рис. 7. Кривые направленности поршневого излучателя.

малые максимумы. Для круглого отверстия появляется добавочный числовой множитель и ширина пучка  $\varphi = 2\theta$  между первыми минимумами определяется выражением  $\varphi = 2 \arcsin 1,22 \lambda/d$  (рис. 7). Уменьшение  $\lambda$  с целью достижения большей направленности требует повышения частоты. Если предельная слышимая ухом частота оказывается превзойдённой, то звуковой эффект можно превращать в визуальный, например, на экране катодной трубки, или же при помощи гетеродинирования сигнал может переводиться в слышимую область. Эти технические методы хорошо разработаны и не вносят затруднений в применение ультразвуковой частоты.

Рефракция звуковых лучей благодаря переменному коэффициенту преломления воды представляет, по всей вероятности, главный фактор, искажающий подводную картину, «видимую» при помощи звука. Главными параметрами, от которых зависит скорость звука, являются температура, давление и солёность. Солёность имеет значение только вблизи берегов, где реки доставляют заметные количества пресной воды. В глубоком океане только распределение температур и давлений определяют скорость и вместе с тем рефракцию звука. Влияние давления носит совершенно постоянный характер и потому не составляет особенной помехи, температурные же условия на первой сотне метров под уровнем моря весьма изменчивы в зависимости от времени года, времени дня, облачности, скорости ветра и прочих метеорологических условий. За исключением участков постоянных течений или близких к таковым, температура в общем убывает монотонно, но нерегулярно от 10 — 20° С до температуры максимальной плотности (4° С) на больших глубинах. Использование звука надводными кораблями и подводными лодками на малых глубинах находится в сильной зависимости от больших температурных различий и резких градиентов, существующих часто на первых 10 метрах под поверхностью моря. Те самые градиенты, которые позволяют лодке сохранять равновесие, могут до такой степени исказить ход звуковых лучей, что участки с большим температурным градиентом оказываются почти непроницаемыми для звуковых сигналов.

Зависимость скорости звука от температуры и давления в интервале температур  $6^{\circ} \text{C} < t < 17^{\circ} \text{C}$  даётся выражением  $v = 1410 + 4,21 t - 0,037 t^2 + 0,0175 d \text{ м/сек}$ , где  $d$  — глубина в метрах (рис. 8). Особый интерес представляют два частных случая. Первый — равномерное убывание температуры вблизи от поверхности на несколько десятых градуса на метр. Принимая температуру поверхности в  $15^{\circ} \text{C}$  и температурный градиент  $\gamma \frac{\text{град } \text{C}}{\text{метр}}$ , мы получим  $v = v_0(1 - 2,12 \cdot 10^{-3} \gamma d)$ , где  $v_0$  означает скорость на поверхности. В среде, где показатель преломления меняется в одном измерении, ход звукового луча, выходящего с поверхности под углом  $\theta_0$ , может быть вычислен по закону Снеллиуса, согласно которому произведение показателя преломления на косинус угла, образованного лучом с нормалью к направлению изменения коэффициента преломления, является постоянным. Таким образом,

$$\frac{\cos \theta}{v} = \frac{\cos \theta_0}{v_0} \quad \text{или} \quad \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} = 1 - 2,12 \cdot 10^{-3} \gamma d$$

и, как видно из рис. 9, звуковой луч представляет дугу круга, образующую с поверхностью угол  $\theta_0$ , радиус который равен  $\frac{1}{2,12 \cdot 10^{-3} \gamma \cos \theta_0}$ . Лучи изогнуты вниз в форме дуг кругов радиусом

в несколько тысяч метров при градиенте в несколько десятых градуса на метр. Если градиент неоднороден, то кривизна лучей меняется, а если градиент колеблется во времени, что действительно

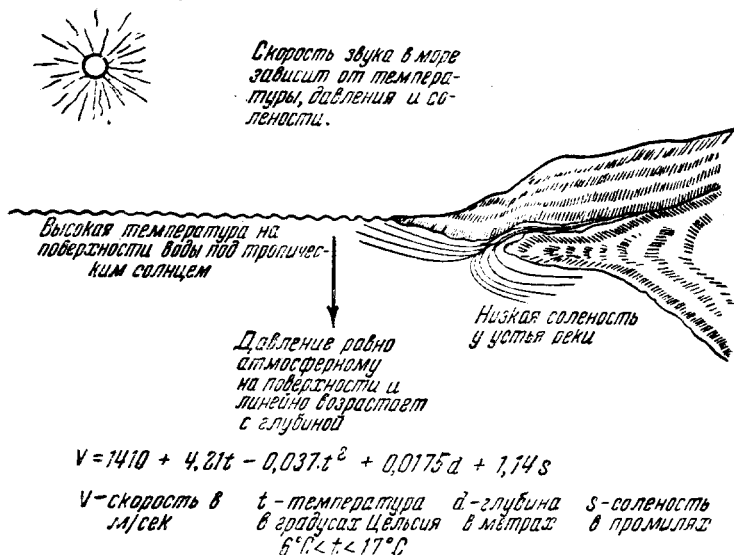


Рис. 8. Параметры, влияющие на скорость звука в море.

имеет место, то звуковые лучи изгибаются и смещаются, напоминая картину оптических лучей в воздухе над горячей плитой.

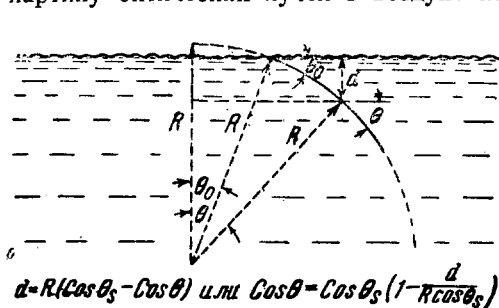


Рис. 9. Искривление звукового луча книзу при линейном температурном градиенте.

$= 4[1 + (2 - d^2)]$ , где  $d$  — глубина в километрах. Подставляя эту величину в выражение скорости звука, получим приближенно  $v = 1,46 - 17,5(2 - d) + 15,7(2 - d)^2$  км/сек. Это выражение имеет минимум на глубине  $d_m = 1,45$  км, и, отсчитывая вертикально высоту у

Второй интересный случай соответствует большой глубине, где температура медленно падает, стремясь к температуре максимальной плотности воды, и условия весьма устойчивы и постоянны в течение всего года. Результат мало зависит от специальных допущений; мы можем допустить, что температура возрастает по квадратичному закону от  $4^\circ$  на глубине 2000 м до  $20^\circ$  на поверхности или  $t =$

от этого уровня, мы найдём  $v = 1,45 (1 + 1,1 \cdot 10^{-2} y^2)$ . Так как скорость звука возрастает для глубин, больших и меньших, чем эта глубина, то лучи изгибаются в направлении к этому уровню и образуют то, что называется «глубоким звуковым каналом»\*) (рис. 10). Лучи, слабо наклонённые к горизонту, стягиваются в этот канал, и так как затуханием практически можно пренебречь, то интенсивность звука падает пропорционально не квадрату, а первой степени

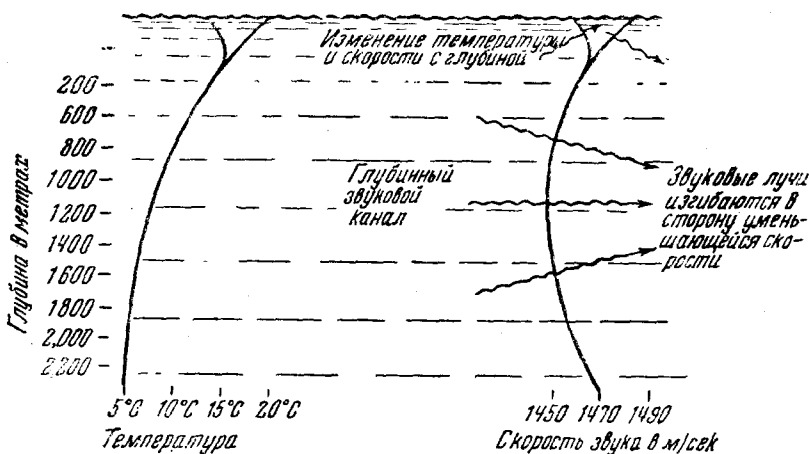


Рис. 10. Возникновение глубоководного звукового канала.

расстояния. Звуковые сигналы от небольших взрывов, распространяясь по такому каналу через океан из Дакара (Зап. Африка), были услышаны на Багамских островах, потратив около часа на покрытие этого расстояния. Использование глубоководных звуковых каналов для определения местонахождения судна при помощи производства небольших взрывов и определения разности времён пробега звука до нескольких станций наблюдения обещает сыграть большую роль в спасательных работах на море. Этот метод известен под сокращённым названием «Софар» (Sound Fixing and Ranging).

Закон Снеллиуса может быть также использован для расчёта звукового луча в звуковом канале при малых углах между вектором распространения звука и горизонталью. С достаточным приближением  $\cos \theta = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \theta$ , и так как  $\operatorname{tg} \theta = \frac{dy}{dx}$ , уравнение  $\frac{\cos \theta}{v} = c$  переходит в

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{(1 - cv_m) - c_v v_m cy^2},$$

\*) Другое объяснение и точный расчёт явления «звукового канала» даны недавно Л. М. Бреховских, ДАН, т. 62, вып. 4 (1948). (Прим. перев.)



где  $c = \frac{\cos \theta'}{v'}$  (штрихи указывают начальные условия) и  $v = v_m (1 + \epsilon y^2)$ . Интегрирование непосредственно даёт

$$y = \sqrt{\frac{1 - cv_m}{cv_m \epsilon}} \sin [ \sqrt{2cv_m \epsilon} (x + \varphi) ],$$

где  $\varphi$  — константа интегриации. Если начальное смещение луча и его наклон малы, уравнение переходит в приближённое

$$y = \sqrt{y'^2 + \frac{\theta'^2}{2\epsilon}} \sin \sqrt{2\epsilon} (x + \varphi).$$

Таким образом, траектории представляют собой синусоиды с периодом  $\frac{2\pi}{\sqrt{2\epsilon}}$ , как изображено на рис. 11.

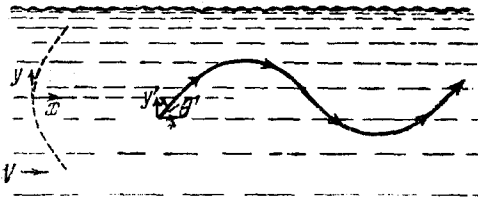


Рис. 11. Луч в звуковом канале.

Используя значение  $\epsilon$ , данное выше, мы найдём, что длина волны равна 42,5 км. Интересно отметить, что для луча, совпадающего с горизонталью на глубине минимальной скорости, затрачивается больше времени на прохождение

определённого расстояния, чем для луча, идущего по синусоиде. Время, затраченное на прохождение пути  $S$ , равно

$$\tau = \int_0^S \frac{ds}{v} = \int_0^{2\pi/2\epsilon} \frac{dx}{cv_m (1 + \epsilon y^2)^2} = \frac{2\pi}{\sqrt{2\epsilon} v_m} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \epsilon y'^2 + \frac{1}{2} \theta'^2 \right) \right].$$

Если  $y'$  и  $\theta'$  не исчезают, то звук имеет более короткое время пробега, чем если они равны нулю. Это хорошо видно при приёме сигналов софара, которые длятся до 10 сек. и заканчиваются резким хлопком, когда приходит наиболее медленная волна, идущая по центральной части канала.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗВУКА ПОДВОДНЫМИ ЛОДКАМИ

Физическими свойствами моря определяется акустическая техника подводной лодки — так называемый «Сонар» (сокращённо от Sound Navigation and Ranging). Из предыдущего уже ясно, что море представляет исключительные трудности для работы акустическими средствами. Море полно звуков всевозможного происхождения и, что является самым серьёзным, наполнено звуками, издаваемыми самим судном. Источник этих звуков расположен так, что производит наибольший вред: в непосредственном соседстве с излучателем. Если шум корабля силен, то эффективное использование акустических

средств почти невозможно, так как сигнал почти полностью маскируется фоном. Первое правило при работе сонара — это возможность уменьшить шум корабля. Некоторые естественные шумы, как, например, шум прибора и шумы, издаваемые ракообразными, могут быть полезны для локации берега и отмелей, в общем же шумы моря оказываются полезными только для маскирования собственных шумов судна от наблюдения противника.

Затухание звука в море мало и море наполнено объектами, рассеивающими звук. Оно ограничено сверху колеблющейся отражающей поверхностью, и снизу — неправильным по форме и непостоянным по условиям отражения дном. Помимо того, звуковые лучи искривлены температурными неоднородностями. В целом приходится удивляться самой возможности эффективного использования акустических средств. Грубой оптической аналогией явились бы условия видимости в помещении, ограниченном колеблющимися зеркалами и наполненном клубами пара и светящимися точками. Однако основательное изучение свойств моря и кропотливая разработка, усовершенствование и испытание оборудования привели к созданию аппаратуры сонара, удовлетворяющей наиболее насущным нуждам подводного плавания. Большинство практических проблем, которые пришлось разрешить, относится к области электроники и инженерного дела и, таким образом, не относится к физике подводной лодки. Тем не менее, настоящий очерк был бы неполон без краткого описания устройств для подслушивания и локации — двух обширных областей применения акустики в морском деле.

Подслушивание, как показывает название, представляет собой пассивный приём звуков, приходящих к подводной лодке от каких-либо звучащих объектов. Интенсивность принимаемого на лодке звука в общем обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника, но этот закон модифицируется местными условиями рефракции. Так как высокие частоты при распространении заметно подавляются, то выделяются низкочастотные компоненты и ослабляются гармоники. Если сигнал, принятый гидрофоном, много слабее случайных шумов, то никакая степень последующего электрического усиления не даёт возможности извлечь из такого сигнала полезной информации. В стремлении к увеличению эффективности основные усилия направляются к уменьшению фона случайных шумов и повышению угловой и частотной избирательности, с тем чтобы звуки, приходящие с нежелательного направления и обладающие нежелательной частотой, могли быть исключены. Сделанные нами выше замечания о диффракции и о форме пучков показывают, что угловая и частотная селективность тесно связаны между собой; низкие частоты дают более широкую диффракционную картину и меньшую направленность, чем высокие. Кроме того, при подслушивании ширина полосы, выделяемой фильтрами, не может быть уменьшена слишком сильно. В противном случае будут уничтожены характерные особен-

ности каждого звука, благодаря чему может быть потеряна ценная информация.

Магнестрикционный гидрофон представляет пример современного прибора для подслушивания (рис. 12), обладающего высокой чувствительностью и механической прочностью. Он представляет собой закрытую с концов никелевую трубку, имеющую внутри продольную перегородку, набранную из стальных листов, вокруг которой на двух деревянных сердечниках помещена обмотка. Никель, замыкающий магнитный поток между концами стальных пластинок,

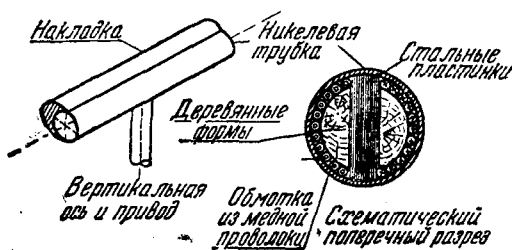


Рис. 12. Схема магнестрикционного гидрофона.

намагничивается током, пропускаемым по обмотке. В силу магнестрикционных свойств никеля изменения давления на трубку вызывают изменения магнитного потока, пронизывающего обмотку, и, таким образом, звуковые волны превращаются в переменную разность потенциалов между концами обмотки, которая может быть усилена, подвергнута фильтрации и детектирована.

Трубка имеет около 1,5 м в длину. Для длин волн, меньших чем 0,75 м, половина углового расхождения пучка может быть с погрешностью, не превышающей нескольких процентов, принята равной  $\lambda/1,5$ . Для 15 000 периодов в секунду половина углового расхождения пучка составляет около  $3^\circ$ , а для 2000 периодов — около  $30^\circ$ . Диаметр никелевой трубки составляет несколько сантиметров и трубка практически не имеет направленности в плоскости, перпендикулярной к своей оси. Специальная накладка уничтожает её чувствительность к волнам, приходящим сзади. Выделяемый пучок приобретает, таким образом, форму дольки апельсина, и вращение трубки вокруг оси, перпендикулярной к её собственной оси, даёт возможность определения азимута шума.

При звуковой локации излучатель посылает короткий звуковой импульс, для чего по его цепи пропускается кратковременная посылка тока высокой частоты; вслед за тем производится автоматическое переключение на приёмное устройство и излучатель превращается в гидрофон, принимающий эхо, если таковое поступит. Передатчики для локации во многом сходны с гидрофонами для выслушивания, с тем лишь различием, что они должны в качестве излучателей давать максимальную отдачу, какая только возможна без возникновения кавитации. Селективность при выслушивании может быть, однако, гораздо большей, так как приниматься и усиливаться должна только узкая полоса спектра, а именно та, которая была излучена. Это

позволяет значительно подавить нежелательные шумы. Расстояние до объекта, давшего эхо, сразу же определяется по формуле  $\tau/2v$ , где  $\tau$  — интервал времени между посылкой импульса и приёмом, а  $v$  — скорость звука. Множитель 2 вызван тем, что за время  $\tau$  звук проходит путь дважды.

Рис. 13 представляет схему типичного излучателя для локации. Большое число никелевых трубок приварено к стальной плите, имеющей узкий флянец для крепления её к корпусу корабля или к специальной поддерживающей конструкции. Длина трубок и толщина плиты так подобраны, чтобы система имела резонанс на выбранной частоте, имея пучности на свободных концах трубок и на передней поверхности плиты и узел — на флянцах крепления. Импульс тока высокой частоты проходит через обмотки никелевых трубок и магнитоотрицательный эффект приводит систему в колебание. Согласование импедансов между плитой и водой создаёт излучение звуковой энергии в этом направлении, а несогласованность с импедансом воздуха предотвращает потерю энергии на акустическое излучение.

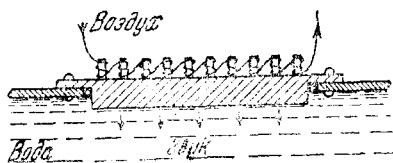


Рис. 13. Схема излучателя.

Подобным же образом волна, падающая на плиту из воды, приводит систему в колебание, и возбуждённая в катушках электродвижущая сила усиливается и регистрируется приёмником.

Одним из первых применений этой методики был эхо-лот, служащий для измерения глубины. В этом устройстве излучатель крепится прямо к днищу корабля и даёт широкий звуковой пучок, направленный вертикально вниз. Интервал времени до прихода эхо даёт непосредственную меру глубины моря. Автоматический ключ включает ток периодически и отсчёт на шкале или на автоматической записи прямо даёт глубину в единицах длины.

Эхо, приходящее от дна моря, обычно наблюдается легко, однако этим методом можно обнаруживать и определять местонахождение гораздо более мелких объектов, дающих соответственно более слабое эхо, если только условия не слишком неблагоприятны. Корпуса подводных и надводных судов, киты и стан рыб, заросли водорослей, резкие неоднородности температуры и солёности вызывают своеобразное эхо. Типичный локационный излучатель для обнаружения подводных лодок монтируется так, что нормаль к его поверхности располагается вертикально (рис. 14), и снабжается устройством для вращения вокруг вертикальной оси для определения азимута цели. Он напоминает акустический прожектор, могущий изменять азимут и иногда также наклон посылаемого пучка. Если излучатель стабилизирован относительно движений корабля, он может давать достаточно точные данные о направлении объекта. Расстояние до него вы-

числяется из времени пробега, так же как и в случае эхо-лота. Трудности, возникающие при идентификации объекта, легко понять; однако опытный оператор о многом может судить по характеру эхо. Если имеет место относительное движение по линии, соединяющей корабль и объект, то эффект Допплера, увеличиваемый при гетеродинировании, часто помогает идентификации, хотя киты иногда движутся даже быстрее, чем подводные лодки. Определение глубины разведываемого объекта часто сильно затруднено близостью к поверхности воды, дающей собственное отражение, а также искривлением звукового пучка вследствие изменения температурных условий.

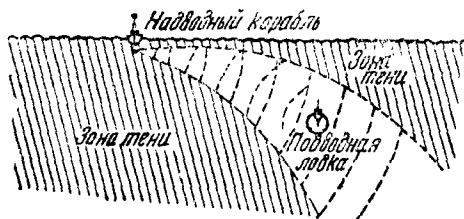


Рис. 14. Звуковая локация подводной лодки.

Физики и инженеры проделали большую работу по созданию сонара, однако в течение долгих лет морской войны глубинными бомбами было забросано больше рыбьих стай и зарослей водорослей, чем подводных лодок. И всё же сонар представляет собой метод, на котором должна строиться разведка подводных лодок. С лучшей современной аппаратурой бдительность, настойчивость и искусство оператора сонара делает чудеса даже в среде, доставляющей столько трудностей, как океан.