

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ВОДОРЫБНОЙ  
СРЕДЕ

Инж. Е. В. ШИШКОВА

Интенсивность звуковых волн в море по мере удаления от источника звука убывает по двум причинам: вследствие распределения звуковой энергии по поверхности, увеличивающейся с расстоянием (геометрическое убывание), и из-за потерь в среде. Ослабление интенсивности, связанное с потерями в среде, характеризуется коэффициентом пространственного затухания и для бесконечной однородной среды выражается формулой

$$I = \frac{P_a \gamma}{4 \pi r^2} 10^{-0.1 \beta r}, \quad (1)$$

где:  $P_a$  — акустическая мощность излучателя;  
 $\gamma$  — коэффициент концентрации излучателя;  
 $r$  — расстояние от источника звука;  
 $\beta$  — коэффициент пространственного затухания в дБ на единицу расстояния.\*

На распространение звуковых волн в реальных морских условиях влияет отражение их от поверхности моря и дна. Отражение звука от волновой поверхности моря носит нестабильный характер. В поверхностном слое, содержащем большое количество газовых пузырьков, происходит особенно сильное поглощение звука. Энергия звуковых волн, падающих на дно, частично переходит в грунт, а частично отражается; степень отражения зависит от характера грунта, угла падения и частоты колебаний.

Одной из причин затухания волнового процесса являются потери, обусловленные вязкостью водной среды и ее теплопроводностью. На звуковых частотах, особенно на ультразвуковых, влияние теплопроводности относительно мало; процесс изменения состояния происходит настолько быстро, что выделяющаяся теплота не успевает передаваться окружающей среде.

Рассмотрим, каково будет затухание ультразвука в воде. Коэффициент пространственного затухания  $\beta$ , обусловленный вязкостью, определяется по формуле

$$\beta = \frac{8 \pi^2 \mu}{3 \rho c^3} f^2, \quad (2)$$

где:  $\mu$  — коэффициент вязкости;  
 $f$  — частота ультразвука;  
 $\rho$  — плотность среды;  
 $c$  — скорость распространения звука в воде.

\* Если интенсивность одного звука  $I_1$ , а другого  $I_2$ , то считают, что первый звук громче второго на  $K$  дБ (децибел);  $K = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}$ .

Из этой формулы видно, что коэффициент  $\beta$  пропорционален квадрату частоты, следовательно, частота сильно влияет на величину коэффициента пространственного затухания. Если в формулу (2) подставить значения входящих в нее величин для воды ( $\mu=1,5 \cdot 1,0^{-2}$   $\rho=1$   $г/см^3$ ;  $c=1,5 \cdot 10^5$   $см/сек$ ), то для расстояний, измеряемых в километрах, получим  $\beta=1,2 \cdot 1,0^{-11} f^2$ .

Акустические волны возбуждают колебательные и вращательные движения составных частей молекул, вследствие чего также поглощается часть энергии (переходит в тепло). С учетом этих внутримолекулярных потерь коэффициент пространственного затухания принимает вид  $\beta=3 \cdot 10^{-11} f^2$ .

Однако экспериментальные данные о поглощении звука в море свидетельствуют о том, что это поглощение значительно больше. Коэффициент пространственного затухания меняется в широких пределах и зависит от гидрологических условий.

Для иллюстрации влияния потерь в среде на ослабление звука приведем табл. 1, показывающую во сколько раз уменьшается интенсивность звука при различных значениях коэффициента пространственного затухания и удаления от источника звука на расстояние 1,5 и 10 км\*.

Таблица 1

Коэффициент пространственного затухания в $об/км$	Расстояние в $км$		
	1	5	10
1	1,3	3,1	10
2	1,6	10	$10^2$
3	2,0	31	$10^3$
4	2,5	100	$10^4$
5	3,1	300	$10^5$
6	4	1000	$10^6$

Напомним кратко результаты исследований поглощения звука в морской воде, обратимся к рассмотрению поглощения ультразвука рыбой и измерению величины этого поглощения.

Из практики применения гидроакустической техники для поиска рыбных скоплений известно, что ультразвуковой импульс, посылаемый эхолотом, проходя сквозь плотный рыбный косяк, значительно ослабляется по сравнению с таким же импульсом, доходящим до дна помимо косяка. На рис. 1 приведена эхограмма скопления хамсы.

Запись произведена вертикальным трактом рыболокатора «Скорпион» с использованием небольшого усиления.

На эхограмме четко видно, что ультразвуковые импульсы, доходившие до дна непосредственно через водную среду, давали более сильное отражение, чем импульсы, отражавшиеся от той части дна, которая находилась под косяком и лишь слабо «просвечивала» сквозь него. На рис. 2 показана эхограмма с записью косяка хамсы. Рельеф дна под косяком не был записан совсем. Можно было бы привести очень много подобных примеров, свидетельствующих о том, что ультразвуковые импульсы, проходя сквозь рыбный косяк, теряют свою интенсивность. Последнее объясняется двумя причинами: часть энергии отражается от многочисленных рыбных тел и рассеивается в рыбном скоплении, частично возвращаясь к приемнику эхолота, а некоторая доля поглощается водо-

\* Таблица заимствована из книги В. Н. Тюлина, А. П. Сташкевича, А. М. Тюрина «Теоретические основы гидроакустики».

рыбной средой, вследствие чего энергия по мере распространения постепенно убывает.

Тело рыбы представляет собой неоднородную среду, содержащую объемы различной плотности, отличающиеся по плотности от воды, а также мельчайшие пузырьки газов, поэтому рыбные скопления сильно поглощают звук.

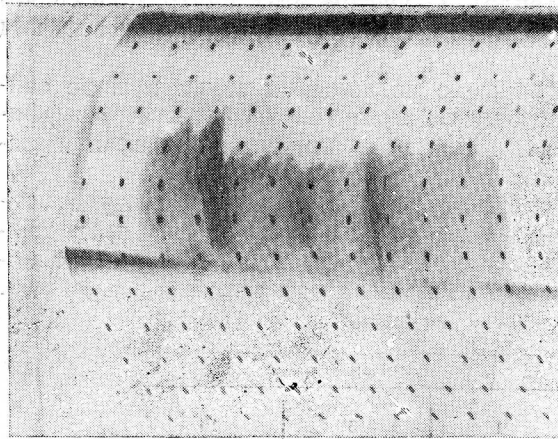


Рис. 1. Запись косяка хамсы протяженностью 360 м и находящегося на глубине 15—40 м.

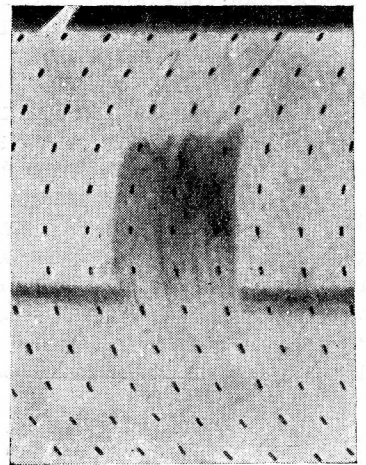


Рис. 2. Запись скопления хамсы протяженностью 120 м и находящегося на глубине 17—37 м. Улов составил 150 ц.

Измерение поглощения ультразвука рыбой производилось под руководством В. П. Глотова на Черном море с использованием установки, разработанной в Акустическом институте АН СССР им же. В качестве поглощающего объекта была использована живая крупная ставрида, имевшая длину в среднем 23 см. Измерения производились как с морской водой, так и с рыбой в различных концентрациях. Если в камеру, наполненную водой, излучать звуковые импульсы и вслед за этим регистрировать звуковое давление, то можно наблюдать, что вследствие многократного отражения от стенок камеры звучание в ней будет продолжаться. Это послезвучание, т. е. существование звука в точке излучения после того как источник звука перестал действовать, носит название реверберации. На слух реверберация воспринимается как флюктуирующий нерегулярный постепенно убывающий по силе отзвук, возникающий в момент перехода на прием; этот отзвук может длиться от долей секунды до нескольких секунд и имеет примерно ту же высоту, что и посылка. Флюктуирующий характер реверберации связан с явлением интерференции, обусловленной волновой природой звука. Благодаря интерференции (взаимному усилению или ослаблению волн при их наложении друг на друга) реверберация от  $n$  одинаковых рассеивателей не всегда будет в  $n$  раз больше реверберации от одного рассеивателя. Звуки, возвращающиеся в какой-либо момент от рассеивателей, могут взаимно уничтожить один другого в точке приема, сводя суммарную интенсивность к нулю. В другой раз вследствие сложения звуков от отдельных рассеивателей суммарная интенсивность может оказаться в  $n^2$  раз больше реверберации от отдельного рассеивателя. Возможны, разумеется, и любые промежуточные значения интенсивности.

В гидроакустике реверберация часто маскирует принимаемый акустический сигнал и может сделать невозможным прием эхосигнала, ес-

ли уровень последнего будет ниже уровня реверберации в данный момент.

В данном же методе измерений явление реверберации используется для измерения поглощения звука средой.

На рис. 3 приведен образец ленты самописца Неймана с записью реверберации. Крайняя правая часть кривой изображает уровень помех. Следующий за ней крутой прямолинейный участок отображает нарастание напряжения на входе самописца вслед за его включением на запись. Максимальное значение этого напряжения соответствует уровню сигнала 75 дБ, после чего колебания постепенно затухают, что отображается спадающей кривой, доходящей снова до уровня помех, составляющих примерно 15 дБ. Время реверберации определяется как проекция аппроксимирующей прямой, соответствующей спаданию уровня сигнала на 60 дБ в масштабе скорости движения ленты. В данном случае скорость движения ленты составляет 50 мм/сек.



Рис. 3. Лента самописца Неймана с записью реверберации.

Для выяснения предельно допустимой концентрации рыбы, позволяющей еще произвести отчетливую запись, делались предварительно прикидочные измерения с различным количеством рыбы в камере. Для получения наибольшей точности в каждом опыте производилось от 10 до 60 измерений в зависимости от разброса показаний; затем вычислялось среднее значение времени реверберации.

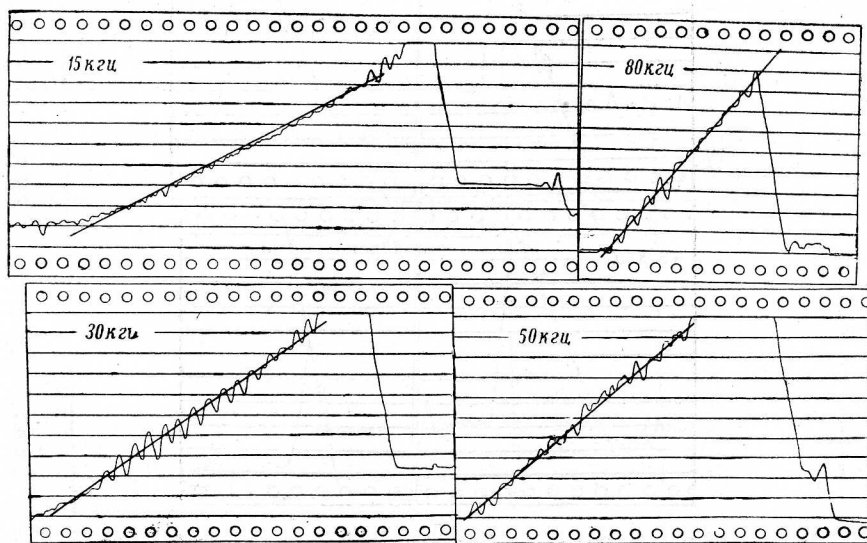


Рис. 4. Запись реверберации в камере с водой на различных частотах.

На рис. 4 показана фотография лент с записями на четырех частотах в камере, заполненной водой (без рыбы). На рис. 5 приведена фо-

тография лент с записями реверберации на четырех частотах для камеры с водой и 16 рыбами. В этом случае затухание звука идет бы-

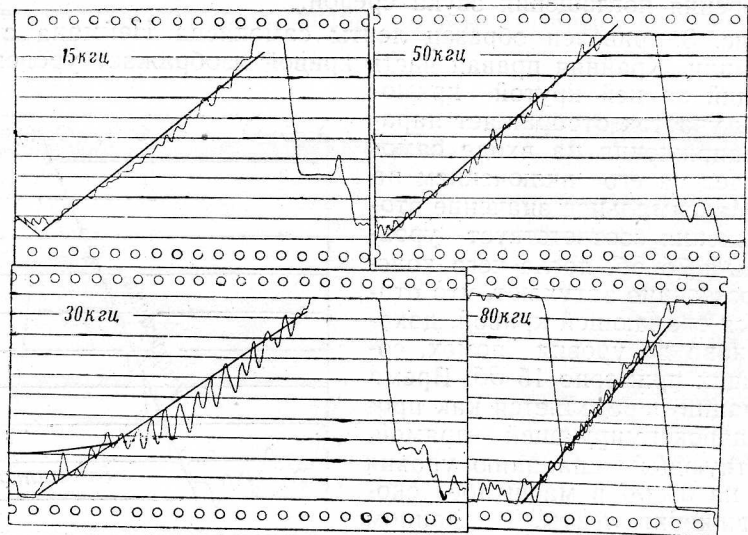


Рис. 5. Запись реверберации в камере с водой и 16 рыбами на различных частотах.

стрее, чем в камере с водой без рыбы. Еще более круто идут кривые реверберации для случая, когда в камеру были помещены 43 крупных

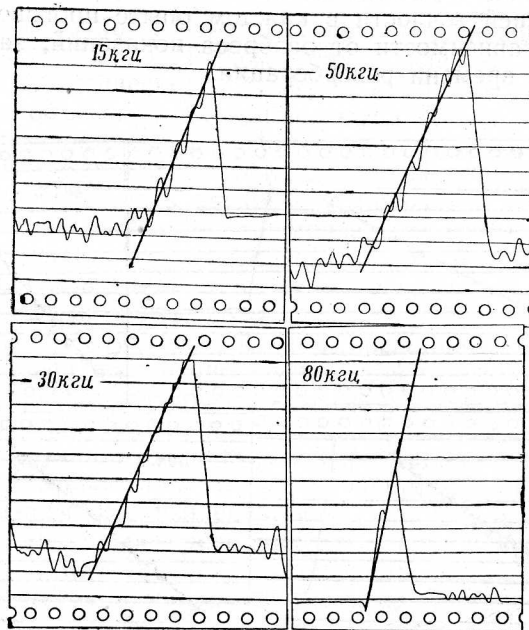


Рис. 6. Запись реверберации в камере с водой и 43 рыбами.

рыбы (рис. 6). Результаты многократных измерений позволили произвести вычисления средних значений времени реверберации и составить табл. 2.

Таблица 2

Содержание камеры	Время реверберации при частоте в кгц			
	15	30	50	80
Вода . . . . .	1,36	1,18	0,917	0,707
Вода с 16 рыбами . . . . .	0,715	0,716	0,655	0,485
Вода с 43 рыбами . . . . .	0,281	0,308	0,325	0,209

Пользуясь полученными при измерениях значениями времени реверберации, производим расчет величины поглощения ультразвука в водорыбной среде, для чего введем следующие обозначения:

$T_0$  — время реверберации в камере с водой;

$T_p$  — время реверберации в камере с водой и рыбой;

$N$  — число децибел, соответствующее прохождению пера самописца за время  $T_0$ .

Затухание звукового давления в воде по времени будет

$$\alpha_{0\tau} = \frac{N}{T_0} \text{ дБ/сек.}$$

Для воды с рыбой затухание звукового давления по мере увеличения расстояния на каждый 1 км составит

$$\alpha_{0l} = \frac{\alpha_{0\tau}}{c} \text{ дБ/км,}$$

где  $c$  — скорость звука в воде.

Расчет поглощения сводим в табл. 3.

Таблица 3

Частота в кгц	Расчетные величины	Содержимое камеры		
		вода	вода с 16 рыбами	вода с 43 рыбами
15	Время реверберации $T$	1,36	0,715	0,281
30		1,18	0,716	0,308
50		0,917	0,655	0,325
80		0,707	0,485	0,209
15	$\alpha_{0\tau} = \frac{N}{T} \text{ дБ/сек}$	44	84	213
30		50,9	83,8	194,5
50		65,5	91,5	185
80		85	123,5	287
15	Поглощение $\alpha_{0l} = \frac{\alpha_{0\tau}}{c}$	29,3	56	142
30		33,9	55,8	130
50		43,7	61	123,5
80		56,7	82,5	191
15	Поглощение ультразвука рыбой $\Delta \alpha_l = \alpha_{pl} - \alpha_{0l}$	—	26,7	112,7
30		—	21,9	96,1
50		—	17,3	79,8
80		—	25,8	134,3

По данным табл. 3 строим график (рис. 7) зависимости коэффициента поглощения ультразвука рыбой  $\Delta\alpha_1$  в  $\text{дБ/км}$  от числа рыб в данном объеме воды для различных частот.

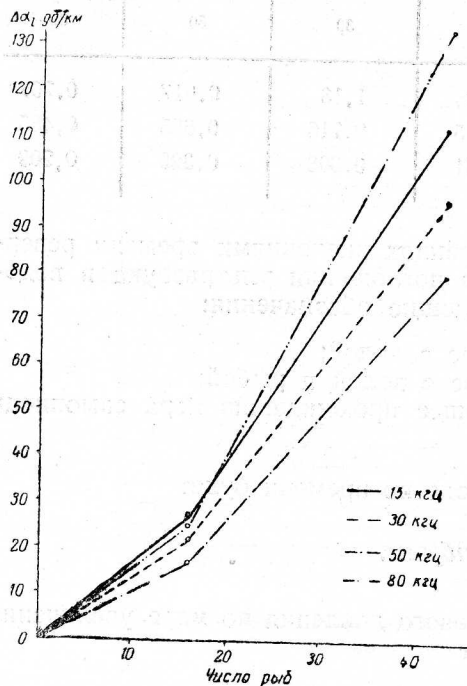


Рис. 7. График зависимости коэффициента поглощения ультразвука от количества рыбы для разных частот.

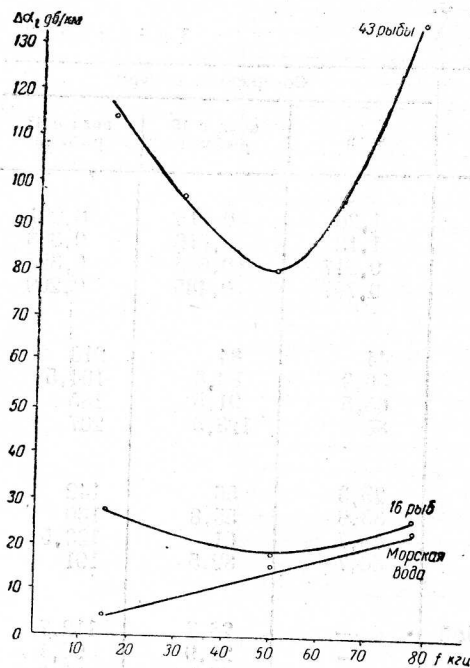


Рис. 8. График зависимости коэффициента поглощения ультразвука от частоты для различных количеств рыбы.

Как видно из графика, с увеличением количества рыб в камере на всех частотах поглощение возрастает.

На рис. 8 по данным табл. 3 изображена зависимость коэффициента поглощения ультразвука от частоты для двух различных количеств рыбы. Этот рисунок показывает, что при большем количестве рыб поглощение ультразвука больше. Сильно выраженной зависимости поглощения от частоты не наблюдается. Возможно, такая зависимость и имеется, однако для выявления ее необходимо больше детальных опытов.

Если при поиске рыбы используют большое усиление приходящего сигнала, то на эхограмме не получается оттенков в записи грунта под косяком и вне его; при малом усилении эхосигнала грунт под косяком регистрируется слабее, чем при прямом контакте с ним ультразвукового луча. По таким эхограммам можно судить об относительной плотности рыбного косяка. Что же касается количественного представления об улове, то его можно составить лишь на основании статистики эхограмм и обловов. Такую статистику необходимо собирать для промысловых рыб на всех бассейнах.

Исходя из полученных предварительных данных о поглощении ультразвука рыбой, можно сказать, что рыбные косяки протяженностью в несколько сот метров не пронизываются ультразвуком, следовательно, нет нужды давать длинные посылки, так как при этом увеличиваются помехи от реверберации.

Располагая большим количеством экспериментальных данных по поглощению ультразвука рыбой, можно сделать ряд практических выводов для рыболокации: по выбору рабочих частот, по выбору длительности посылки, по созданию для рыболокаторов и рыбных эхо-

лотов новых типов электронных отметчиков, которые позволили бы по форме эхосигнала судить о плотности рыбного косяка.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бреховских Л. М. и Иванов И. Д., Об одном особом виде затухания при распространении волн в слоисто-неоднородных средах, «Акустический журнал», 1955, т. 1, вып. 1—4.
2. Бажулин П. А., Поглощение ультразвуковых волн в жидкостях, «ЖЭТФ», 1938, т. 8, вып. 4.
3. Гинзбург В. Л., Об общей связи между поглощением и дисперсией звуковых волн, «Акустический журнал», 1955, т. 1, вып. 1—4.
4. Мандельштам Л. И. и Леонтович М. А., К теории поглощения звука в жидкостях, «ЖЭТФ», 1937, т. 7, вып. 3.
5. Сухаревский Ю. М., Реверберация моря при наличии поглощения звука, «ДАН СССР», 1947, т. VIII, № 2.
6. Сухаревский Ю. М., Теория реверберации моря, обусловленной рассеиванием звука, «ДАН СССР», 1947, т. V, № 9.
7. Сухаревский Ю. М., Реверберация моря при направленном излучении и приеме звука, «ДАН СССР», 1947, т. VIII, № 1.
8. Сухаревский Ю. М., О характере флуктуаций реверберации моря, «ДАН СССР», 1947, т. VIII, № 5.
9. Тюлин В. Н., Сташкевич А. П., Тюрин А. Н., Теоретические основы гидроакустики, ВМАКВ им. Крылова, 1955.
10. Markham J. J., Beuer R. T., Lindsay R. B., Поглощение звука в жидкостях, «Rev. Mod. Phys.», 1951, 23, перевод «Проблемы современной физики», № 9. Акустика (сборник переводов и обзоров иностранной периодической литературы), ИЛ, 1953.
11. Libermann L. N., The origin of Sound Absorption in Water and Sea Water, «JASA», 1948, № 6.