

Л. М. БРЕХОВСКИХ

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗВУКА В СЛОЕ ЖИДКОСТИ С ПОСТОЯННЫМ ГРАДИЕНТОМ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 27 VII 1948)

1. В опытах, проведенных Л. Д. Розенбергом в июле 1946 г., было обнаружено весьма медленное спадание интенсивности распространяющихся в глубоком море звуковых импульсов по мере увеличения расстояния.

В связи с этим, в настоящей заметке мы рассматриваем некоторые вопросы, связанные с распространением звука в глубоком море. При этом мы учитываем повышение скорости звука с глубиной, происходящее вследствие возрастания гидростатического давления. Насколько автору известно, влияние этого обстоятельства на распространение звука до сих пор не учитывалось.

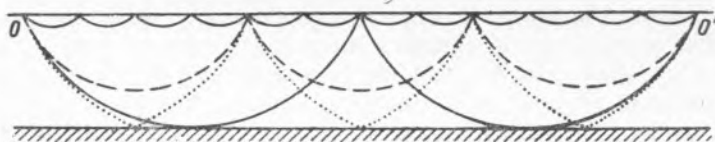


Рис. 1

Как будет показано ниже, градиент скорости, обусловленный давлением, ведет к эффекту, аналогичному эффекту шепчущих галлерей⁽¹⁾. Повидимому, только этим и можно объяснить факт распространения звука в море на очень большие расстояния.

2. Градиент скорости звука, обусловленный увеличением гидростатического давления, почти постояен по глубине и соответствует изменению скорости примерно на 1,8 м/сек. на каждые 100 м глубины⁽²⁾. Это постоянство градиента нарушается только в поверхностном слое толщиной порядка 100 — 200 м, где скорость звука, в основном, определяется температурой воды и меняется в зависимости от метеорологических условий. Однако в тех случаях, когда глубина моря значительно больше, чем толщина этого поверхностного слоя, можно, идеализируя картину, считать что постоянный градиент скорости имеет место во всем слое воды от ее поверхности до дна.

Тогда, при расположении излучателя и приемника звука вблизи поверхности воды, мы получим картину звуковых лучей, схематически изображенную на рис. 1.

Все лучи представляют собой дуги окружностей. Их можно разбить на два класса. Лучи первого класса загигаются вверх, не доходя до дна (например пунктирный луч на рис. 1); лучи второго класса

имеют отражения от дна (например луч, изображенный точечным пунктиром). На границе второго класса лежит касающийся дна луч, изображенный на рисунке сплошной линией. Он имеет наименьшее число отражений от поверхности воды по сравнению со всеми прочими лучами. На рисунке изображен также один из лучей первого класса, имеющий большое число отражений от поверхности воды.

Каждый из лучей первого класса, покидая точку O под углом скольжения χ (угол, образуемый лучем с горизонталью), достигает максимальной глубины

$$Z_m = \frac{1 - \cos \chi}{a \cos \chi} \quad (1)$$

и вновь возвращается к поверхности воды на расстоянии

$$\Delta x = \frac{2 \operatorname{tg} \chi}{a} \quad (2)$$

Здесь $a \cong 0,012 \text{ км}^{-1}$ — отношение градиента скорости звука к скорости звука у поверхности воды.

Нетрудно видеть, что лучи первого класса обуславливают концентрацию звуковой энергии вблизи поверхности воды. В самом деле, все лучи, углы скольжения которых при выходе из точки O лежат между 0 и χ , будут концентрироваться в слое толщины $\frac{1 - \cos \chi}{a \cos \chi} \cong$

$$\cong \frac{\chi^2}{2a}.$$

При уменьшении χ эта толщина убывает как χ^2 , в то время как угол, а значит, и излученная в него энергия убывает только, как χ , т. е. значительно медленнее. У самой поверхности в лучевом приближении плотность энергии становится бесконечно большой.

Этот эффект полностью аналогичен объясненному Рэлеем эффекту шепчущих галлерей. Последний заключается в увеличении плотности звуковой энергии вблизи искривленных поверхностей.

Приведенные выше рассуждения перенесены нами без всяких изменений из работы Рэля (1). Разница заключается только в том, что в случае Рэля искривлена граница, а лучи прямолинейны, в то время как у нас граница среды плоская, искривленными же являются лучи.

Бесконечно большая плотность звуковой энергии вблизи поверхности указывает на неприменимость в этой области лучевой картины. Однако изложение волнового расчета, уточняющего картину звукового поля, не входит в задачу настоящей заметки.

3. Рассмотрим теперь процесс распространения звуковых импульсов в море при этих условиях.

Время пробега импульса по любому лучу первого класса от одного отражения от поверхности воды до другого дается формулой:

$$\Delta t = \frac{1}{c_0 a} \ln \frac{1 + \sin \chi}{1 - \sin \chi}, \quad (3)$$

где c_0 — скорость звука у поверхности воды.

Нетрудно убедиться в том, что это время будет всегда меньше, чем время пробега луча, идущего по горизонтали. При заданном положении излучателя и приемника наименьшим временем пробега будет обладать импульс, идущий по граничному лучу — сплошная линия на рис. 1. После него придет импульс по лучу, изображенному пунктиром, и т. д.

Чем больше отражений от поверхности воды будет испытывать луч, тем позднее придет бегущий по нему импульс. Последним придет импульс, распространяющийся по горизонтали. При этом время между приходом соседних импульсов непрерывно уменьшается и стремится к нулю для последних импульсов. При этом на ленте звукозаписывающего аппарата из-за сгущения импульсов будет отмечаться усиление интенсивности принимаемого звука.

После прихода горизонтального луча интенсивность резко падет, так как после этого будут приходить только импульсы с отражениями от дна, бегущие по лучам второго класса. Заметим, что эти импульсы начинают приходить сразу же после прихода импульса, бегущего по граничному лучу. Однако они дают малую интенсивность, так как проходят друг за другом со значительными временными промежутками и, кроме того, могут ослабляться при отражении от дна.

Полученные в опытах Л. Д. Розенберга результаты находятся в согласии с найденными качественными закономерностями. Для достаточно больших расстояний звуковая энергия концентрируется в области конца записи. При уменьшении расстояния место концентрации энергии передвигается в направлении начала записи.

Пренебрежение поверхностным слоем, которое мы делаем, предполагая постоянство градиента скорости звука по всей глубине, не сказывается сколько-нибудь существенно на граничном луче и близких к нему лучах, если глубина моря достаточно велика по сравнению с толщиной поверхностного слоя, так как на основной части пути этих лучей градиент постоянен.

Более существенно поверхностный слой скажется на лучах, близких к горизонтальному, однако изложенная выше качественная картина явления едва ли изменится.

Если в поверхностном слое скорость звука падает с глубиной, как это бывает, например, в летнем режиме моря, то лучи, распространяющиеся под малыми углами, будут загигаться вниз, не доходя до поверхности воды. В результате повышенная концентрация плотности звуковой энергии будет иметь место не у самой поверхности воды, а в некотором слое ниже ее. Глубина этого слоя, по которому и распространяется основная часть звуковой энергии, различна в различных морях, но, повидимому, в большинстве случаев лежит в пределах 100—500 м.

Автор приносит Л. Д. Розенбергу свою благодарность за обсуждение относящихся сюда вопросов.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева
Академии Наук СССР

Поступило
27 VI 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Д. В. Рэлея, Теория звука, 2, § 287, 1944. ² Н. V. Sverdrup, M. W. Jonson and R. H. Fleming, The Oceans; their Physics, Chemistry and General Biology, N. Y., 1942, p. 77.