

Н. Н. АНДРЕЕВ, член-корреспондент Академии Наук СССР

### О ГОЛОСЕ МОРЯ

В. В. Шулейкин объясняет открытый им <sup>(1)</sup> «голос моря» — инфразвуковые колебания, исходящие от его поверхности, предполагая, что колебания эти возникают вследствие ударов ветра по гребням волн. Вот его подлинные слова <sup>(2)</sup>: ...«В воздухе, как среде, легко сжимаемой, должны возникать колебания плотности, вызванные периодическими встречами (ветра) с гребнями морских волн. Если расстояние между этими гребнями... мы примем равным примерно 1 м и если скорость ветра будет порядка 10 м/сек., то одна и та же масса воздуха будет встречаться на своем пути с вершинами водяных холмов примерно через каждую десятую долю секунды. Тем самым в воздухе будут возбуждены продольные инфразвуковые волны с частотой порядка 10 Нз».

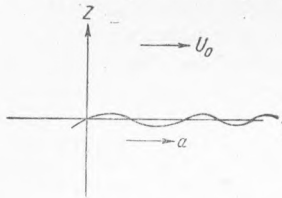
В этом объяснении отсутствует физическая картина звукообразования, а потому оно представляется прежде всего неопределенным. Но в вышеприведенном изложении (если эту неопределенность попытаться расшифровать) оно может оказаться и содержащим внутреннее противоречие. В самом деле, по видимому В. В. Шулейкин представляет себе, что периодичность звука задается числом встреченных ветром гребней. Но это понятно только, если стать на точку зрения наблюдателя, движущегося с ветром. Для наблюдателя, стоящего на берегу, частота определится числом колебаний в месте образования звука, а это число не зависит в рассматриваемой точке моря от скорости ветра по отношению к скорости волн, а только от скорости волн. Скорость же ветра может влиять только на амплитуду голоса моря\*. Но наблюдаемая в этом случае частота была бы частотой морских волн, т. е. порядка 1 м. По любезному сообщению В. В. Шулейкина я знаю, что такие частоты он также наблюдал, но не о них идет речь в его объяснении, а о частотах порядка 10 Нз.

Порядок мощности этих волн В. В. Шулейкин подсчитывает, исходя из расчета Джеффриса <sup>(2)</sup>, который имел своим назначением определить критерий возникновения волн от ветра. Но и в расчете Джеффриса речь идет не об ударах, а о средней силе трения ветра о море, приводящей при достаточной скорости его к нарушению устойчивости малых колебаний поверхности.

\* В самом деле, так как уравнения акустики движущейся среды хотя и отличны от обычных, но все же линейны, решение имеет множитель  $e^{j\omega t}$ , причем  $\omega$  определяется колебанием границ. Взаимного перемещения источника и наблюдателя, обуславливающего применение принципа Доплера, в нашем случае нет.

В связи с этими замечаниями не будут, как мне кажется, лишены интереса нижеследующие соображения.

Прежде всего остановимся на голосе моря в 10 Нз. Если его нельзя объяснить, исходя из плавного течения ветра вдоль поверхности волн, то зато весьма естественно предположить, что он обусловлен вихреобразованием при обтекании ветром гребня волны. Образование периодических вихрей за препятствием, обтекаемым постоянным потоком, давно



известно и хорошо изучено, например за цилиндром и пластинкой<sup>(3)</sup>. В этом случае частота вихреотделения, а следовательно и частота образующегося звука управляются безразмерным соотношением:

$$\frac{ND}{U} = f \left( \frac{UD}{\nu} \right), \quad (1)$$

данным еще лордом Рейли. Здесь  $U$  — скорость ветра по отношению к цилиндру,  $D$  — диаметр цилиндра,  $N$  — частота вихреотделения,  $\nu$  — вязкость воздуха,  $\frac{UD}{\nu} = R$  — число Рейнольдса. Формула эта хорошо подтверждается опытом<sup>(3)</sup>. В нашем случае можно попытаться принять за  $D$  высоту волны, например 100 см.  $U$  положим равным  $3 \cdot 10^3$  см/сек. Наконец  $f$  мало зависит от  $R$ , и для цилиндра опыт дает  $f \sim 0.2$ <sup>(3)</sup>. Отсюда имеем

$$N = \frac{0.2 \cdot 3 \cdot 10^3}{10^2} = 6 \text{ Нз},$$

т. е. порядок величины, близкий к интересующему нас. При всей его грубости (от цилиндра к синусоидальной поверхности моря!) расчет этот показывает по нашему мнению, что происхождение голоса моря за счет периодического вихреобразования весьма вероятно, и вопрос этот заслуживает изучения. Было бы интересно изучить звукообразование от вихрей на модели моря — вращающемся в воздухе большом цилиндре с волнистой поверхностью. Из опытов с таким цилиндром можно было бы определить  $f(R)$  в безразмерной формуле (1), а по  $f$  и наблюдаемым скоростям ветра и периодам волн можно было бы подсчитать и частоты возможных голосов моря.

Но кроме вихреобразования инфразвуковые колебания могут возникнуть в воздухе и вследствие колебания морских волн на его границе. Если исходить для первой ориентировки из предположения малых колебаний и некоторых других указываемых ниже упрощающих предположений, то можно произвести грубый расчет подобного явления.

Предположим, что имеем дело с двухразмерными волнами синусоидального типа. Следовательно на нижней границе воздуха  $z = 0$  (см. фигуру) имеем условие:

$$v_z = \omega_0 e^{j\omega \left( t - \frac{x}{a} \right)}, \quad (2)$$

где  $a$  — скорость распространения морских волн в направлении  $x$ ,  $\omega$  — их круговая частота,  $\omega_0$  — амплитуда их скорости. Совместно с этим граничным условием надо найти звуковой потенциал воздуха, который, как было мною показано ранее<sup>(4)</sup>, удовлетворяет системе уравнений:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + 2u_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} + u_0^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = c_0^2 \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$p = \rho_0 \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right), \quad (4)$$

$$v_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad (5)$$

причем  $u_0$  — скорость ветра, предполагаемая направленной по оси  $x$ -ов и одинаковой на всех высотах, а  $c_0$  — скорость плоских звуковых волн в покое.

Наиболее подходящий для нашей цели частный интеграл есть:

$$\varphi = \varphi_0 e^{j\omega \left( t - \frac{\alpha x + \gamma z}{c_1} \right)}, \quad (6)$$

подстановка которого в уравнение (3) и граничное условие (2) позволяет определить  $\varphi_0$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $c_1$ .

В результате находим:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\delta z + j\omega \left( t - \frac{x}{a} \right)}, \quad (7)$$

где

$$\delta = \frac{\omega}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{u_0 - a}{c_0} \right)^2}, \quad (8)$$

$$\varphi_0 = -\omega_0 \frac{a}{\omega \sqrt{1 - \left( \frac{u_0 - a}{c_0} \right)^2}}, \quad (9)$$

$$p = j\omega\rho_0\varphi \left( 1 - \frac{u_0}{a} \right). \quad (10)$$

Таким образом мы, как и следовало ожидать, имеем дело с наличием в воздухе поверхностной волны с амплитудой давления:

$$|p| = \frac{\omega_0 (u_0 - a) c_0}{\sqrt{c_0^2 - (u_0 - a)^2}} e^{-\delta z}. \quad (11)$$

Следовательно сила звука пропорциональна  $\omega_0^2 = (\xi_0 \omega)^2$  ( $\xi_0$  — амплитуда волны) и почти пропорциональна  $(u_0 - a)^2$ , убывая при этом с высотой над уровнем морской поверхности. Следует отметить, что, как всегда для поверхностных волн, скорость их меньше скорости звука и в нашем случае равна скорости  $a$ , т. е. порядка 30 м/сек.

Так как морские волны имеют большие амплитуды при частоте в 1 Нз, то становится вероятным, что голос моря этой частоты вызван нашими поверхностными волнами. Было бы интересно проследить опытами на корабле в области волнения экспоненциальную зависимость  $e^{-\delta z}$  с высотой. В случае ветра, усиливающегося с высотой, расчет наш уже неприменим, как и в случае турбулентного ветра; но характер явления сохраняется и в этих случаях. От наличия градиента  $\delta$ , надо ожидать, возрастет.

Расчет наш имеет силу только в области волнения. За его пределами звуковая энергия воздуха, созданная этим волнением, распространяется в разные стороны различно и с обычной звуковой скоростью, слабее с расстоянием.

Считая  $\xi_0 = 100$  см,  $\omega = 2\pi$ , находим при  $(u_0 - a) = 3 \cdot 10^3$  давление  $|p|$  в динах приблизительно равным  $2 \cdot 10^6$  дин, что объясняет большую звуковую мощность их (в области волнения; далее она убывает, грубо говоря, по закону квадратов).

Несмотря на грубость нашего расчета он все же представляет по нашему мнению интерес, так как, с одной стороны, дает указание на

существование звукообразования типа поверхностных волн, а с другой стороны, ясную физическую картину этого звукообразования.

Впрочем кроме инфразвукового голоса море имеет и разные другие не только в области слышимых частот (шум прибоя, пересыпаемых волнами камней и т. п.), но и в области частот ультразвуковых. Последние в противоположность первым двум наблюдались только под водой Ланжевром и Марселем и представляют высокочастотные собственные колебания пересыпаемых морем мелких камешков.

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

Поступило  
10 IV 1939.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. В. Шулейкин, ДАН, III, 259 (1935). <sup>2</sup> В. В. Шулейкин, Физика моря, II, 83 (1938). <sup>3</sup> Одна из последних работ: R. Lehnert, Phys. ZS., 38. 476—498 (1937), и там же обширная литература. <sup>4</sup> Н. Н. Андреев и И. Г. Русаков, Акустика движущейся среды (1934).