

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

ЗАМЕЧАНИЯ К СТАТЬЕ А. А. ЭЙХЕНВАЛЬДА „АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ“ *

Б. В. Дерягин, Москва

Обычно в акустике пользуются, в качестве первого приближения, „линеаризированными“ уравнениями гидродинамики. Статья А. А. Эйхенвальда имеет целью выявить, какие следствия получаются, если не останавливаться на этом приближении, а пойти дальше, например сохранив члены второго порядка малости относительно амплитуд.

При этом, ограничиваясь случаем плоских волн, А. А. Эйхенвальд тем самым, что крайне существенно, предполагает существование потенциала скоростей.

Значительная часть статьи А. А. Эйхенвальда содержит приложения теории к объяснению возникновения комбинационных тонов и притом в основном в воздухе.

Совершенно несомненно, что выведенные в этой статье формулы показывают возможность возникновения комбинационных тонов в воздухе как следствие наличия членов второго порядка в потенциале скоростей. Но физическая сущность вопроса лежит не в этой плоскости; важно показать, что величина получающегося в теории эффекта достаточна для появления практически заметных комбинационных тонов и соответствует их интенсивности, измеренной на опыте, так что другие возможные причины появления комбинационных тонов могут не приниматься в расчет.

Насколько мне известно, до сих пор вообще не доказано экспериментально появление объективных комбинационных тонов в воздухе, за исключением случаев появления гармонических обертонов вблизи тела, которое само колеблется строго синусоидально, например вблизи ножек камертона; это явление А. А. Эйхенвальд вполне последовательно относит к разряду комбинационных тонов.

Единственной работой, содержащей количественные измерения интенсивности, а также фазы этих (и, насколько мне известно, вообще каких бы то ни было) комбинационных тонов, является работа, напечатанная мною под заглавием „Messungen der Amplitude und Phase der Oktave bei der Stimmgabel“ (Phys. Zs. d. Sowjetunion 3, 574, 1933).

Измерения интенсивности октавы показали, что она пропорциональна квадрату интенсивности основного тона, что могло бы служить количественным подтверждением теории А. А. Эйхенвальда (и вообще является первым количественным подтверждением основной предпосылки теории комбинационных тонов Гельмгольца).

Иначе, однако, обстоит дело с измерениями фазы октавы относительно основного тона, как я сейчас покажу.

Эта статья, повидимому, осталась А. А. Эйхенвальду неизвестной, иначе он бы убедился, что она дает отрицательный ответ на поставленный выше вопрос, касающийся физической значимости его гидродинамической теории возникновения комбинационных тонов. Поскольку значительный

* См. Успехи физических наук, XIV, 552, 1934.

круг читателей „Успехов физических наук“, включая специалистов, может таким образом быть неправильно ориентирован, я считаю необходимым на этом основном пункте остановиться.

Привожу in extenso следующее место моей вышецитированной работы, по существу уже содержащее указанный отрицательный ответ: „... Легко развить более точную теорию, если взяв гидродинамические уравнения, которым должен удовлетворять потенциал скоростей, сохранить в них члены второго порядка относительно амплитуд.

Если, однако, последовать этому пути, то для разности фаз Δ давления октавы и основного тона камертона получается значение не нуль *, а $\frac{1}{4}$ **.

Для объяснения подобного расхождения необходимо предположить (на что указал мне П. П. Лазарев), что причина возникновения октавы лежит в образовании вихрей у острых краев ножек камертона. Так как, согласно нашим измерениям, разность фаз Δ равна нулю с большой точностью, то, очевидно, образование вихрей нужно практически считать единственной причиной возникновения октавы...

Что при наличии потенциала скоростей неизбежно получается $\Delta = \pm \frac{1}{4}$, приведено мной было без доказательства из нежелания удлинять статью изложением теорий, не подтверждаемых опытом. Легко, однако, показать справедливость этого утверждения как раз на примере тех расчетов, которые согласно А. А. Эйхенвальду позволяют объяснить *** появление октавы камертона (рис. 568).

Действительно, для случая плоской волны, распространяющейся в сторону положительных x -ов от синусоидально колеблющейся поверхности, А. А. Эйхенвальд получает следующее выражение для скорости u_x частиц воздуха, выраженной через локальную координату Эйлера x (§ 12, стр. 567):

$$u_x = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{C_0} \right) - \frac{A^2}{2C_0} - \frac{A^2}{2C_0} \cos \frac{4\pi}{T} \left(t - \frac{x}{C_0} \right), \quad (1)$$

где t — текущее время и C_0 — скорость распространения. Первый член правой части соответствует основному тону, третий октаве; так как соответствующие давления пропорциональны скоростям, то надо найти разность фаз гармонической функции:

$$\sin 2\pi \frac{t'}{T}$$

и ее октавы:

$$-\cos 4\pi \frac{t'}{T} = \sin 2\pi \left(\frac{2t'}{T} - \frac{1}{4} \right),$$

где

$$t' = t - \frac{x}{C_0}.$$

Искомая разность фаз в том определении, которое для нее принято в моей работе (стр. 578—580), равна:

$$\Delta = -\frac{1}{4},$$

и т. д.

* Полученное при моих измерениях с точностью до 0,01 периода.

** Отвлекаясь от знака $\pm$.

*** Впрочем, само объяснение А. Эйхенвальда вызывает недоумение. Ведь октаву камертона любой человек может слышать и без всякой слуховой трубки!

Таким образом как раз приводимый А. А. Эйхенвальдом случай октавы камертона опровергает его теорию, если пользоваться полученным мною на опыте результатом $\Delta = 0$.

Вместе с тем следует вообще поставить под сомнение возможность появления комбинационных тонов в воздухе как результат членов второго порядка в потенциале скоростей.

Что при распространении гармонической волны на далеком расстоянии этот эффект может наступать, также не доказано А. А. Эйхенвальдом (см. § 11), так как не учтено затухание колебаний, которым в этом случае нельзя пренебрегать, и к тому же обычно амплитуда уменьшается благодаря сферичности волн, тогда как А. А. Эйхенвальд проводит расчеты только для плоских волн.

Резюмируем.

В § 17 А. Эйхенвальд суммирует возможные причины возникновения комбинационных тонов.

Вышеизложенное позволяет заключить, что способы 2, 3 и 4 возникновения их экспериментально не подтверждены и имеются веские основания сомневаться в их практической значимости.

Те явление, которые в рубрике 4 описываются как кажущиеся комбинационные тоны, на самом деле представляют собой единственный точно установленный случай появления комбинационных тонов в воздухе, причина которого лежит, повидимому, в образовании вихрей; теория же А. А. Эйхенвальда здесь оказывается неприложимой.

Москва, ВИЭМ, отдел биофизики.
