

ЛИТЕРАТУРА

1. Цикулин М. А. О догоне одного треугольного профиля давления другим в асимптотике ударных волн. Прикл. механ. и теор. физика, 1960, 2, 132-138.
2. Фридман В. Е. Об одном случае взаимодействия импульсов с разрывными фронтами. Акуст. ж., 1976, 22, 5, 780-782.
3. Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М., «Наука», 1975.
4. Reed J. W. Atmospheric attenuation of explosion waves. J. Acoust. Soc. Amer., 1977, 61, 1, 39-47.
5. Стебновский С. В. Взаимодействие ударных волн при последовательном подводном взрыве сферических зарядов. Прикл. механ. и теор. физика, 1978, 4, 87-93.
6. Fridman V. E. Comparison of empirical and theoretical laws of parameter variation of explosion waves in the sea. J. Physique, 1979, 40, 11, 924-932.

Горьковский научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила
28 декабря 1979 г.

УДК 534

ЭФФЕКТ БРЮСТЕРА В АКУСТИКЕ И ЭФФЕКТ КОНСТАНТИНОВА

В. А. Дулов

Как известно, в идеальной упругой среде коэффициент отражения продольной волны от жесткой границы, не допускающей касательных смещений, обращается в нуль при некотором угле скольжения; при этом продольная волна полностью переходит в сдвиговую. По аналогии с оптикой, это явление называют эффектом Брюстера, а соответственный угол скольжения называют углом Брюстера.

В вязкой жидкости модуль коэффициента отражения от жесткой границы, не допускающей касательных смещений (т. е. при наличии прилипания), достигает минимума при некотором угле скольжения; этот минимум (равный 0,414) не зависит ни от частоты, ни от свойств жидкости. Это явление называют эффектом Константинова по имени обнаружившего его ученого [1], а соответственный угол скольжения называют углом Константинова.

На первый взгляд нет никакой связи между акустическим эффектом Брюстера в упругих средах и эффектом Константинова в вязких жидкостях. Однако оба этих эффекта можно трактовать как предельные частные случаи одного и того же явления: наличия в любой упруговязкой среде характерного угла скольжения θ_0 продольной волны, при котором при данных граничных условиях коэффициент отражения принимает по модулю минимальное значение (наличие такого минимума следует из того, что при углах скольжения 0 и 90° коэффициент отражения обращается соответственно в -1 и в +1, т. е. достигает наибольших значений по модулю). Ниже характерный угол и соответственный минимальный по модулю коэффициент отражения рассчитаны для водоподобных сред (т. е. сред, в которых при одинаковых деформациях касательные напряжения малы по сравнению с нормальными): для таких сред легко непрерывно проследить весь переход от эффекта Брюстера к эффекту Константинова при непрерывном изменении соотношения между сдвиговой упругостью и вязкостью в среде.

Охарактеризуем водоподобную среду плотностью ρ , параметрами упругости Ламе λ и μ и коэффициентом вязкости η . Для гармонических волн вязкость удобно учитывать, вводя мнимую часть во второй коэффициент Ламе (статический модуль сдвига) и полагая динамический модуль сдвига равным $\mu^* = \mu(1 - i \operatorname{tg} \varphi)$, где φ — угол потерь, связанный с вязкостью соотношением

$$(1) \quad \mu \operatorname{tg} \varphi = \omega \eta,$$

где ω — круговая частота. Для водоподобных сред $|\mu^*| \ll \lambda$. Поэтому волновое число продольных волн в задачах об отражении можно считать вещественным и полагать

его равным $k_l = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{\lambda}}$; волновое число сдвиговых волн комплексно:

$$(2) \quad k_t = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{\mu^*}} = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{\mu}} \sqrt{\cos \varphi} e^{i \frac{\varphi}{2}}.$$

В водоподобных средах выполняется условие

$$(3) \quad k_l^2 \ll |k_t|^2.$$

Частный случай идеальной водоподобной упругой среды соответствует $\varphi = 0$; случай вязкой жидкости соответствует одновременному предельному переходу $\mu \rightarrow 0$, $\varphi \rightarrow 90^\circ$ при выполнении условия (1).

Как известно, в произвольной упругой среде коэффициент отражения V продольной волны, падающей под углом скольжения θ на жесткую стенку, не допускающую касательных смещений, можно записать в виде

$$V = \frac{\sqrt{k_t^2 - k_l^2 \cos^2 \theta} \sin \theta - k_l \cos^2 \theta}{\sqrt{k_t^2 - k_l^2 \cos^2 \theta} \sin \theta + k_l \cos^2 \theta}.$$

Для водоподобных сред эту формулу можно, пользуясь (3), переписать в виде

$$V = \frac{k_l \sin \theta - k_l \cos^2 \theta}{k_l \sin \theta + k_l \cos^2 \theta}.$$

Легко показать, что минимальное значение модуля коэффициента отражения будет достигаться при угле скольжения

$$\theta_0 \approx \sin \theta_0 = \frac{k_l}{|k_t|}$$

и что при этом угле скольжения

$$V_0 = \frac{k_l - |k_t|}{k_l + |k_t|}.$$

Пользуясь (2), получим отсюда

$$V_0 = i \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4}.$$

В водоподобной среде минимальный модуль коэффициента отражения оказывается зависящим только от угла потерь.

Переходя к частным случаям, видим, что для идеальной водоподобной упругой среды ($\varphi=0$) минимальное значение модуля коэффициента отражения действительно равно нулю и достигается при угле скольжения $\theta_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}}$, совпадающем в при-

нятом приближении с известным выражением для акустического угла Брюстера (см., например, [2], стр. 461). Для вязкой жидкости находим, полагая $\varphi=90^\circ$, $|V_0| = \operatorname{tg} 22^\circ 30' = 0,414$ в согласии с [1, § 4.2]. Угол Константинова получается равным

$$\theta_0 = \frac{k_l}{\sqrt{\frac{\rho\omega}{\eta}}}, \text{ что также совпадает с результатом, приведенным в [1].}$$

В заключение приношу благодарность М. А. Исаковичу за предоставление темы и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Константинов Б. П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченной среде. Л. «Наука», 1974.
2. Исакович М. А. Общая акустика. М., «Наука», 1973.

Акустический институт
имени Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила
18 декабря 1979 г.