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 $\mu^*=\mu(1-i\,\mathrm{tg}\,\varphi)$, где φ — угол потерь, связанный с вязкостью соотношением

$$\mu\,\mathrm{tg}\,\varphi=\omega\eta, \tag{1}$$

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

$$k_t=\sqrt{\frac{\rho\omega^2}{\mu^*}}=\sqrt{\frac{\rho\omega^2}{\mu}}\sqrt{\cos\varphi}\,e^{i\frac{\varphi}{2}}. \tag{2}$$

В водоподобных средах выполняется условие

$$k_l^2\ll|k_t|^2. \tag{3}$$

Частный случай идеальной водоподобной упругой среды соответствует $\varphi=0$; случай вязкой жидкости соответствует одновременному предельному переходу $\mu\to0$, $\varphi\to90°$ 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

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

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

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

Пользуясь (2), получим отсюда

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

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 принятом приближении с известным выражением для акустического угла Брюстера (см., например, [2], стр. 461). Для вязкой жидкости находим, полагая $\varphi=90°$, $|V_0|=\mathrm{tg}\,22°30'=0{,}414$ в согласии с [1, § 4.2]. Угол Константинова получается равным $\theta_0=\frac{k_l}{\sqrt{\frac{\rho\omega}{\eta}}}$, 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.