ЛИТЕРАТУРА

1. *Петухов Ю. В.* Поле давления и скорости, создаваемое расширяющейся сферой.– Акуст. журн., 1982, т. 28, № 1, с. 102–105.
2. *Акуличев В. А., Богуславский Ю. Л., Иоффе А. И., Наугольных К. А.* Излучение сферических волн конечной амплитуды.– Акуст. журн., 1967, т. 13, № 3, с. 321–328.
3. *Кидринский В. К.* Приближение Кирквуда – Бете для цилиндрической симметрии подводного взрыва.– Физика горения и взрыва, 1972, т. 8, № 1, с. 115–123.
4. *Наугольных К. А., Рой Н. А.* Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971.
5. *Кочина Н. Н., Мельникова Н. С.* О расширении поршня в воде.– ПММ, 1959, т. 23, № 1, с. 93–100.
6. *Taylor G. L.* The air wave surrounding an expanding sphere.– Proc. Roy. Soc. Ser. A., 1946, v. 186, p. 273–292.
7. *Наугольных К. А.* О расширении цилиндра в жидкости.– Акуст. журн., 1962, т. 8, № 1, с. 136–138.
8. *Бескаравайный Н. М., Поздеев В. А.* Волновые задачи о расширении полости в жидкости с учетом конечности перемещения границ.– В сб.: Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. Киев: Наук. думка, 1980, с. 88–97.
9. *Петухов Ю. В.* Импульс давления, возбуждаемый сферой, расширяющейся с постоянной скоростью.– Акуст. журн., 1983, т. 29, № 1, с. 88–90.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
23.XII.1983

УДК 534.26

СДВИГОВЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ ПОВЕРНУТОГО *Y*-СРЕЗА КВАРЦА С ВЯЗКОЙ СРЕДОЙ

Плесский В. П., Тен Ю. А.

Приповерхностные объемные акустические волны находят все большее применение в акустоэлектронных устройствах [1]. Недавно было показано [2], что вязкая нагрузка поверхности звукопровода приводит к локализации сдвиговой волны у поверхности и затуханию образующихся сдвиговых поверхностных волн. Поскольку на практике в устройствах на приповерхностных волнах чаще всего применяются звукопроводы из кварца (повернутых *Y*-срезов), представляет интерес количественное описание влияния вязкой нагрузки поверхности звукопровода на характеристики распространения волн.

Пусть сдвиговая акустическая волна со смещением по оси $0X$ (повернутый *Y*-срез кварца занимает полупространство $y<0$, в области $y>0$ находится вязкая диэлектрическая среда, газ или жидкость) распространяется вдоль оси $0z$.

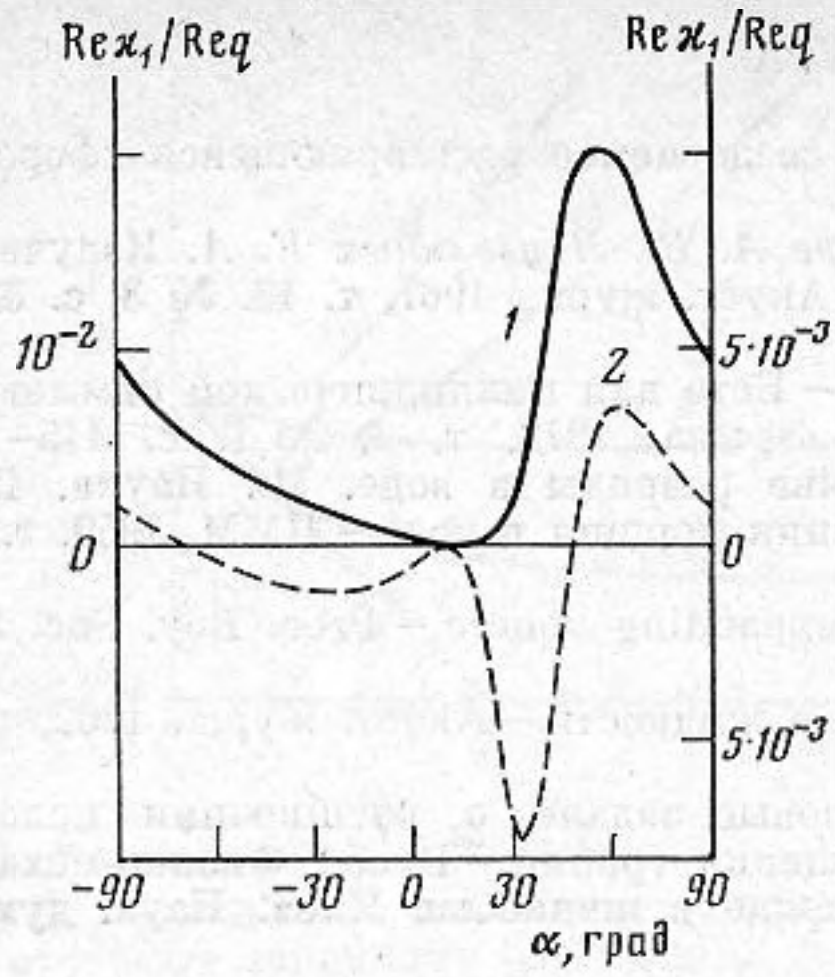
Решая известные уравнения движения [3, 4] и используя механические и электрические граничные условия, удается с учетом малости пьезоэффекта в кварце получить аналитическую формулу для константы спадения $\varkappa_1$ амплитуды смещения вглубь звукопровода (смещение в кварце $U=U_0\exp[\varkappa_1 y+i(qz-\omega t)]$):

$$\varkappa_1=-i\frac{C_{56}}{C_{66}}q+i\frac{\eta_ж\varkappa_3\omega}{C_{66}}+\eta Aq,$$

где ω, q – частота и волновое число приповерхностной сдвиговой акустической волны, C_{ij} – компоненты тензора упругости в новой системе координат, $\eta_ж$ – сдвиговая вязкость жидкости, $\varkappa_3=\sqrt{q^2-i\omega\rho_ж/\eta_ж}$ ($\rho_ж$ – плотность жидкости), $\mathrm{Re}\,\varkappa_3>0$, $\eta=e_{26}^2/(\varepsilon_{33}C_{55})$ – безразмерная константа электромеханической связи (e_{26} – пьезомодуль, ε_{33} – диэлектрическая проницаемость кварца в новой системе координат). Величина A зависит от угла среза кварца и $\mathrm{Re}\,A$ может иметь любой знак (очень громоздкое выражение величины A через константы кварца не приводится).

Из формулы (1) следует, что в кварце (без вязкой нагрузки) могут существовать волны Гуляева – Блюстейна (ВГБ). На фиг. 1 показана зависимость $\mathrm{Re}\,\varkappa_1$ от угла поворота среза α. Результаты совпадают с полученными численными методами в работе [4]: на металлизированной поверхности кварца ВГБ существуют всегда. при этом относительная глубина локализации $(\varkappa_1\lambda)^{-1}\gtrsim 8$, на свободной поверхности очень глубоко проникающие ВГБ существуют ($\mathrm{Re}\,\varkappa_1>0$) при углах $-90°<\alpha<-75°$, $48°<\alpha<90°$. При других углах волны, по-видимому, надо считать «утекающими», но их коэффициент затухания ничтожно мал ($\mathrm{Im}\,q/\mathrm{Re}\,q<10^{-6}$).

С другой стороны, как легко показать, $\mathrm{Re}(i\varkappa_3)>0$, поэтому наличие вязкой среды всегда приводит к локализации волны у поверхности. Воздушная нагрузка при любых частотах не приводит к изменению глубины локализации волны, и затухание волны остается очень малым: $\mathrm{Im}\,q/\mathrm{Re}\,q<10^{-5}$ (поглощение волн в кварце не учитывается).

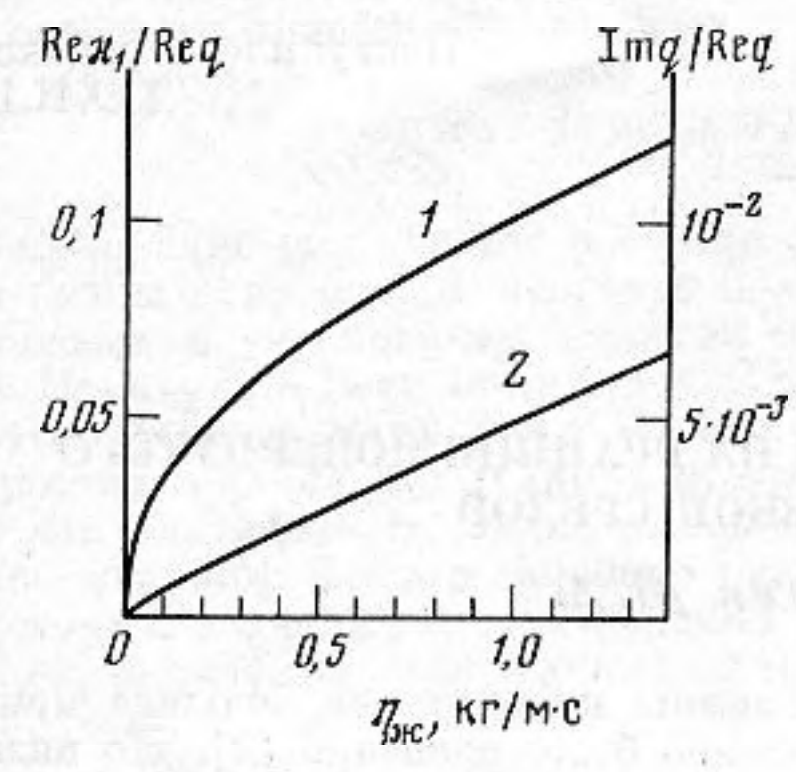


Фиг. 1

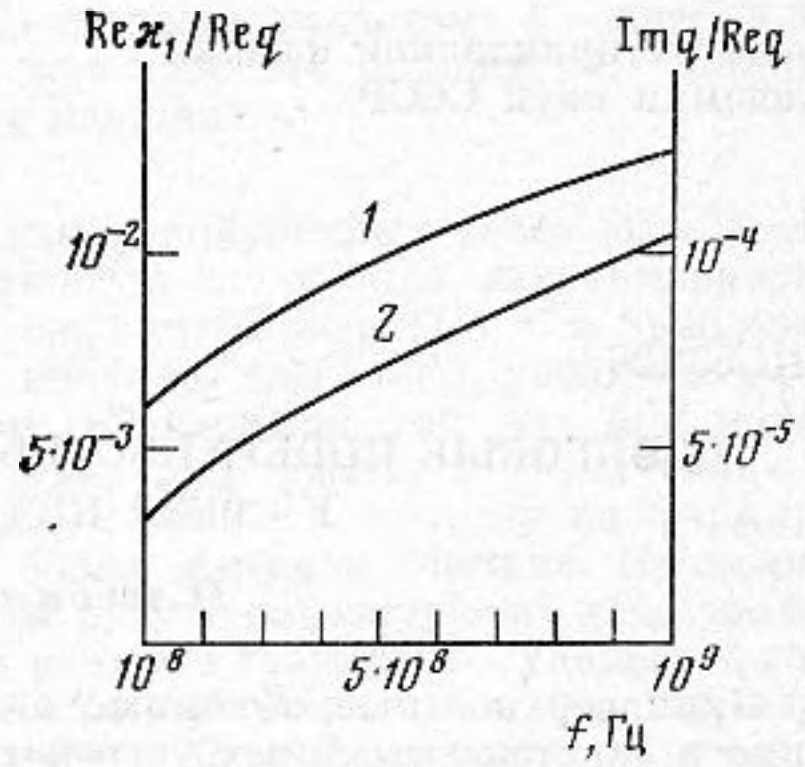
Фиг. 1. Зависимость относительной глубины локализации волн $\mathrm{Re}\,\varkappa_1/\mathrm{Re}\,q$ от угла поворота среза α для: *1* — металлизированной поверхности; *2* — свободной поверхности

Фиг. 2. Зависимость от коэффициента сдвиговой вязкости η_* для частоты 100 МГц: *1* — относительной глубины локализации волн $\mathrm{Re}\,\varkappa_1/\mathrm{Re}\,q$; *2* — нормированного коэффициента затухания $\mathrm{Im}\,q/\mathrm{Re}\,q$

Фиг. 3. Зависимость от частоты при нагружении звукопровода водой ($\eta_*=0{,}001$ кг/(м·с)): *1* — относительной глубины локализации $\mathrm{Re}\,\varkappa_1/\mathrm{Re}\,q$; *2* — нормированного коэффициента затухания $\mathrm{Im}\,q/\mathrm{Re}\,q$



Фиг. 2



Фиг. 3

С увеличением вязкости уменьшается глубина локализации волн и возрастает затухание (фиг. 2). Относительная глубина локализации волны и ее затухание за счет вязкой нагрузки зависят от частоты (фиг. 3). Например, при нагружении поверхности АТ-кварца водой глубина локализации волны $\varkappa_1^{-1}=27\,\lambda$ на частоте 100 МГц, а затухание $\mathrm{Im}\,q\approx1/(4700\,\lambda)$. В случае нагружения глицерином $\varkappa_1^{-1}=1{,}5\,\lambda$ и $\mathrm{Im}\,q\approx1/(24\,\lambda)$.

Авторы благодарны Ю. В. Гуляеву за интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кондратьев С. Н.* Приповерхностно-объемные акустические волны и их использование в акустоэлектронике.– Зарубежная радиоэлектроника, 1981, № 12, с. 53–67.
2. *Плесский В. П., Тен Ю. А.* Сдвиговые поверхностные акустические волны на границе упругого тела с вязкой жидкостью (газом).– Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 5, с. 296–300.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика сплошных сред. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954.
4. *Wilcox J. Z., Yen K. H.* Shear horisontal surface waves on rotated *Y*-cut quartz.– IEEE trans. Sonics and Ultras., 1981, v. SU-28, № 6, p. 449–454.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
15.VI.1984