

## Отражение и прохождение акустических волн из чистой жидкости в пузырьковую под прямым углом

Сафиуллин А.Р.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Из литературы известно, что физико-химические свойства жидкостей в метастабильном состоянии в основном определяются наличием в их составе различных включений, например газовых пузырьков или твердых частиц [1]. В данном случае рассмотрены особенности распространения звука на границе из пузырьковой жидкости, содержащей газовые зародыши, в чистую, при падении под прямым углом.

Пусть в жидкости, находящейся при температуре  $T_0$  и при давлении  $p_0$ , имеются сферические пузырьки радиусом  $a_0$ , которые содержат пар и нерастворимый в жидкой фазе газ. Объемное содержание пузырьков фиксировано  $\alpha_0$ . Рассмотрим прохождение двумерных акустических волн из чистой жидкости в пузырьковую под прямым углом. Схематично задача представлена на рисунке 1.

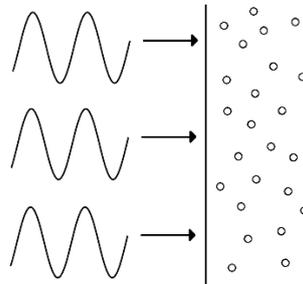


Рис.1. Схематическое изображение задачи

Для описания свойств акустических волн примем следующую систему уравнений, состоящую из приведенного закона сохранения массы, уравнений импульсов, уравнения Рэлея-Ламба, уравнения теплопроводности и диффузии [2]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_l^2} \frac{\partial p_l}{\partial t} + \rho_{l0}^0 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - 3\rho_{l0}^0 \frac{\alpha_0}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} &= 0, \\ \rho_{l0}^0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \quad \rho_{l0}^0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p_l}{\partial y} &= 0, \\ \rho_{l0}^0 \alpha_0 \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} + 4 \frac{\rho_{l0}^0 \nu_l^\mu}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} &= p_g - p_l + \frac{2\sigma}{a_0^2} a, \\ \rho_{l0}^0 c_g \frac{\partial T_g'}{\partial t} = \frac{\lambda_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_g r^2 \frac{\partial T_g'}{\partial r} \right) + \frac{\partial P_g}{\partial t}, \quad \frac{\partial k'}{\partial t} &= \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial k'}{\partial r}, \end{aligned}$$

где индексы  $i = l, v, a$  относятся к параметрам жидкости, пара и газа, а нижний индекс (0) соответствует начальному состоянию,  $u$  и  $v$  – скорости среды,  $a$  – радиус пузырьков,  $C_l$  – скорость звука в жидкости,  $\alpha_0$  – объемное содержание пузырьков,  $\nu_l^\mu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $D$  – коэффициент диффузии.

Для пузырьковой жидкости, описанной выше, определены коэффициенты преломления и отражения волны [3]:

$$S = 2 / \left( 1 + \frac{C_l K}{\omega} \right), \quad R = S - 1, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота возмущений,  $K$  – волновой вектор.

На основе данных уравнений проведены численные расчеты коэффициентов отражения и преломления. Результаты представлены на рисунке 2. Красный, синий и зеленый цвет линий соответствуют значения температур  $T_0 = 300, 353$  и  $373$  К. Сплошные линии обозначают модуль представляемого коэффициента, а штриховые – его аргумент, так как получаемое число является комплексным. Значения объемного содержания  $\alpha_0 = 10^{-3}$ , радиус пузырьков  $a_0 = 10^{-6}$  м.

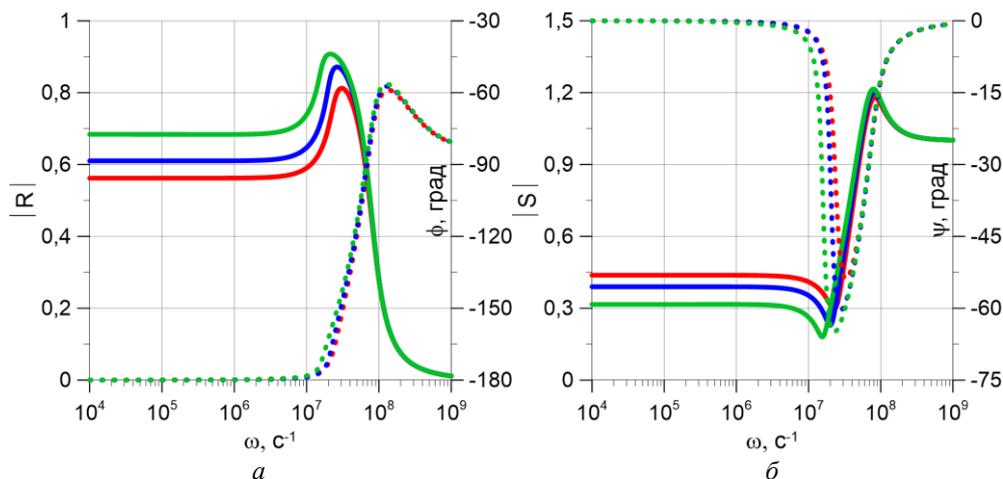


Рис.2. Модули и аргументы коэффициентов отражения (а) и преломления (б)

Для простоты понимания результатов, каждый график можно условно разделить на две части: до миннаэрттовой частоты  $\omega_R$  (собственная частота колебаний пузырьков) и после  $\omega_R$  [3]. До этой частоты графики отличаются, а после нее сливаются в один. Видно, что в низкочастотной области аргумент коэффициента отражения равен  $-180$  градусам, то есть отраженная волна распространяется в противофазе к поступающей. Модуль коэффициента отражения имеет достаточно высокое значение ( $|R| > 0.5$ ), а модуль коэффициента преломления довольно мал ( $|S| < 0.5$ ). То есть волна хорошо отражается и слабо проходит в пузырьковую жидкость. В высокочастотной области отраженная волна практически отсутствует ( $|R| \approx 0$ ) и волна проходит полностью ( $|S| \approx 1$ ). Это связано с тем, что частота среды становится выше частоты колебаний пузырьков. Заметно влияние температуры на кривые: чем выше температура, тем выше содержание пара в пузырьках, и значительнее их влияние на колебания среды. Количественно это выражается в следующей закономерности: с повышением температуры модуль коэффициента отражения увеличивается, а модуль коэффициента преломления уменьшается.

## Список литературы

- [1] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987, Т. 1, 2.
- [2] Особенности распространения звука в теплой воде с воздушными пузырьками / В. Ш. Шагапов, М. Н. Галимзянов, И. И. Вдовенко, Н. С. Хабеев // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 4. – С. 912-921.
- [3] Шагапов, В. Ш. Особенности отражения и прохождения акустических волн на границе "чистой" и пузырьковой жидкостей при прямом их падении / В. Ш. Шагапов, М. Н. Галимзянов, И. И. Вдовенко // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 2. – С. 284-290.