ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ КВАРЦ – ФЛЮИД И КВАРЦ – ГАЗ КАК ФОНОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ, АКУСТИЧЕСИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТ

С.В. Сухинин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия

Актуальность. Изучение и описание распространения волн в гетерогенных средах различного состава и назначения является важным для прикладных задач. Существенной особенностью гетерогенных сред является то, что они являются сильно диспергирующими и имеют полосы частот запирания и полосы частот пропускания. Примерами таких сред являются композиты и нанокомпозиты, негомогенные смеси с периодическим включением компонент, пены, пористые и зернистые структуры. Одномерно-периодические монодисперсные и полидисперсные гетерогенные среды обычно называются фононными кристаллами. В настоящей работе изложены результаты исследования особенностей распространения акустических волн в пористых средах флюид-кварц и газ-кварц, которые являются типичными примерами фононных кристаллов пористого нефтяного, заводненного или газового пласта. В работе описаны: замедляющие свойства фононных кристаллов для длинных волн; полосы запирания и пропускания; резонансные свойства периодических неоднородных структур с компактными и распределенными источниками колебаний; изотропия и анизотропия фононных кристаллов.

Формулировка. Пусть гетерогенная среда состоит из 2 известных компонент пронумерованных как 1я и 2я компоненты. Считается, что среда имеет пространственный период по координате x. Волновые явления считаются установившимися и в каждой из компонент описываются при помощи избыточного давления, которое удовлетворяет системе соотношений [1] .

$$\begin{aligned} &p_{xx}^{(1)} + k^2 p^{(1)} = 0, && p^{(1)} = p^{(2)}, \\ &p_{xx}^{(2)} + k^2 \kappa^2 p^{(2)} = 0 && \tau \cdot \mathrm{p}_{\mathrm{x}}^{(1)} = \mathrm{p}_{\mathrm{x}}^{(2)} \\ &p^{(1)}(x+1) = p^{(1)}(x) e^{i\xi} && p^{(2)}(x+1) = p^{(2)}(x) e^{i\xi} \end{aligned} \tag{0}$$

Здесь $k = \omega H / s_1$ безразмерное волновое число в среде 1, ω - круговая частота, H - наименьший пространственный период фононного кристалла, s_1 и s_2 - скорости звука в среде 1 и 2 соответственно, ξ - сдвиг фазы волны в соседних фундаментальных областях группы переносов, $\kappa = s_1 / s_2$, τ отношение плотности среды 2 к плотности среды 1. Необходимо отметить, что ξ - является волновым числом для волн, распространяющихся в фононном кристалле.

Дисперсионные соотношения для простых волн (1) в монодисперсных фононных кристаллах имеют вид

$$\begin{aligned} &4\tau\kappa[1+\cos(2\xi)] - (\tau+\kappa)^2 \{\cos[c(c-\kappa c+\kappa)+\xi] + \cos[k(c-\kappa c+\kappa)-\xi]\} + \\ &+ (\tau-\kappa)^2 \{\cos[k(c+\kappa c-\kappa)+\xi] + \cos[k(c+\kappa c-\kappa)-\xi]\} = 0 \end{aligned}$$

Здесь c линейная концентрация среды 1 в безразмерных переменных.

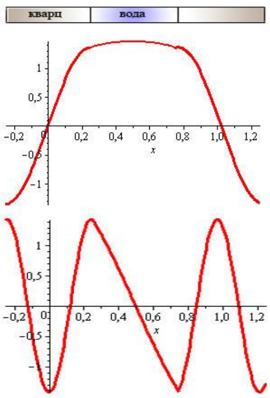
Длинноволновое приближение, ползущая мода. Иногда эту моду называют звуковой иногда сейсмической, в настоящей работе эта мода называется ползущей. Низкочастотное приближение для малых значений k позволяет записать дисперсионное соотношение (ползущая мода). $k_{longwave}(\tau,\xi)=\sqrt{2\tau[1-\cos(\xi)]}\Big/\sqrt{(c+\tau-c\tau)(c\tau-c\kappa^2+\kappa^2)}$

Длина волны L_w ползущей волноводной моды, соответствующей волноводной частоте $k_{longwave}(\xi,c,\tau)$, имеет вид $L_w=2\pi/\xi$. Для малых значений ξ справедливо выражение: $k_{longwave}(\xi,c,\tau)=\xi\sqrt{\tau}\Big/\sqrt{(c+\tau-c\tau)(c\tau-c\kappa^2+\kappa^2)}$. Безразмерная фазовая скорость $C^{(1)}_{ph}(\xi,c,\tau)$ распространения длинной волны ползущей моды определяется, как

$$C^{(1)}_{ph}(\xi,c,\tau)=\sqrt{\tau}\Big/\sqrt{(c+\tau-c\tau)(c\tau-c\kappa^2+\kappa^2)} \tag{2}$$

Для малых τ: $C^{(1)}_{ph}(\xi,c,\tau)=\sqrt{\tau}\Big/\left[\kappa\sqrt{c(1-c)}\right]=(s_2/s_1)\sqrt{\tau/c(1-c)}$.

Необходимо отметить, что фазовая скорость длинной волны ползущей моды зависит только от концентрации, отношения скоростей звука и отношения плотностей двух сред, образующих фононный кристалл.



Определение концентрации двух компонентных сред. При помощи измерения скорости распространения длинных волн в фононном двухкомпонентном кристалле можно определить линейную (объемную) концентрацию. Для этого нужно решить соотношение (2) относительно концентрации c при известной фазовой скорости ползущей моды и известных свойств компонент 1 и 2 фононного кристалла.

Структура спектра частот фононного кристалла. Структура спектра задачи (1) представляет собой бесконечное множество полос пропускания и полос запирания. На рисунке приведен вид поля избыточного давления для двух последующих (после ползущей) волноводных мод для фононного кристалла вода-кварц.

О применимости методов осреднения в фононных наноразмерных кристаллах. Необходимо отметить, что все методы осреднения для фононных кристаллов имеют очень сильное ограничение по частотам. Это связано с тем, что полосы пропускания и полосы запирания при $H\to 0$ представляют собой всюду плотное множество.

О резонансах в фононных кристаллах. Все частоты принадлежащие полосам запирания являются резонансными. Кроме этого резонансными частотами являются частоты для которых групповая скорость рана нулю.

Механика распространения волн в фононных кристаллах. Проведенные исследования волноводных мод показали, что механика распространения волн в периодических цепочках грузик - пружинка [2] и волн в фононных кристаллах аналогичны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сухинин С.В.** Распространение волн и резонансные явления в неоднородных средах. // ПМТФ. 2001. Т. 42, №3, С.32-42.
2. **Бриллюэн Л., Пароди М.** Распространение волн в периодических структурах. М.: Издание иностранной литературы, 1959, 457 с.