АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 3, с. 425–426

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.286.2-14; 577.475

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В СРЕДЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ ЧАСТИЦЫ СО СМЕЩЕННЫМ ЦЕНТРОМ МАСС

© 2003 г. И. Н. Диденкулов, А. Б. Езерский, Д. А. Селивановский

Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: din@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 19.11.2002 г.

Задача о колебаниях маленькой (размерами меньше длины волны звука) инородной частицы в среде, в которой распространяется акустическая волна, известна еще со времен Рэлея [1]. Обычно при рассмотрении взаимодействия акустического поля со взвешенными в жидкости частицами учитываются лишь монопольные и дипольные колебания [2, 3]. Дипольные колебания частиц, как известно, происходят вдоль направления распространения акустической волны. Однако возможны ситуации, когда центр масс частицы не совпадает с точкой приложения силы Архимеда. В этом случае в акустическом поле на нее будет действовать также переменный во времени с частотой звуковой волны вращающий момент сил. Угловые колебания частицы, очевидно, будут сопровождаться вязким трением в жидкости и соответствующими потерями энергии акустического поля.

Можно предположить, что данный механизм взаимодействия звукового поля со взвешенными в жидкости твердыми частицами имеет широкое распространение, так как совпадение центра масс и точки приложения силы Архимеда в общем случае вряд ли имеет место. Угловые колебания частиц заметны, если внутри частицы ее плотность распределена неоднородно. Такая ситуация может иметь место, когда частица представляет собой образование, слипшееся из нескольких разных по плотности частиц. Это могут быть, в частности, материалы, подвергаемые обработке в ультразвуковых аппаратах различного назначения или биологические объекты в океане, такие как фито- и зоопланктон. Нам не известны работы, где бы этот эффект в акустике ранее рассматривался. В данной работе приводится решение задачи об угловых колебаниях сферической частицы со смещенным центром масс в акустическом поле, получено выражение и сделаны оценки дополнительного затухания звука в суспензии таких частиц.

На рис. 1 приведено схематическое изображение рассматриваемой модели. Сферическая частица с расположенным на ее краю точечным довеском массы находится в поле плоской акустической волны. Довесок массы может быть как положительным, так и отрицательным. В последнем случае – это модель сферической частицы с прилипшим к ней маленьким газовым пузырьком. Ориентацию частицы по углу α между радиус-вектором из центра частицы в направлении довеска и направлением падения акустической волны полагаем случайной. Предположим далее, что выполнено условие нейтральной плавучести, т.е. средняя плотность частицы равна плотности окружающей жидкости, а величина довеска массы (Δm) много меньше полной массы частицы m: $|\Delta m| \ll m$.

При этих предположениях уравнение вращательно-колебательных движений такой частицы под действием акустического поля запишется в виде:

$$J\ddot{\alpha} = M_{in} + M_{fr},$$

где

$$M_{fr} = -\frac{8}{3}\nu\rho R^3\dot{\alpha}\frac{3+6b+6b^2+2b^3-2ib^2(1+b)}{1+2b+2b^2},$$
$$M_{in} = -i\frac{k(-\Delta m)R\sin\alpha p(t)}{\rho}, \quad b = \frac{R}{\delta(\omega)}. \tag{1}$$

Здесь M_{in} – момент сил инерции, действующий в звуковом поле на сферическую частицу с массой

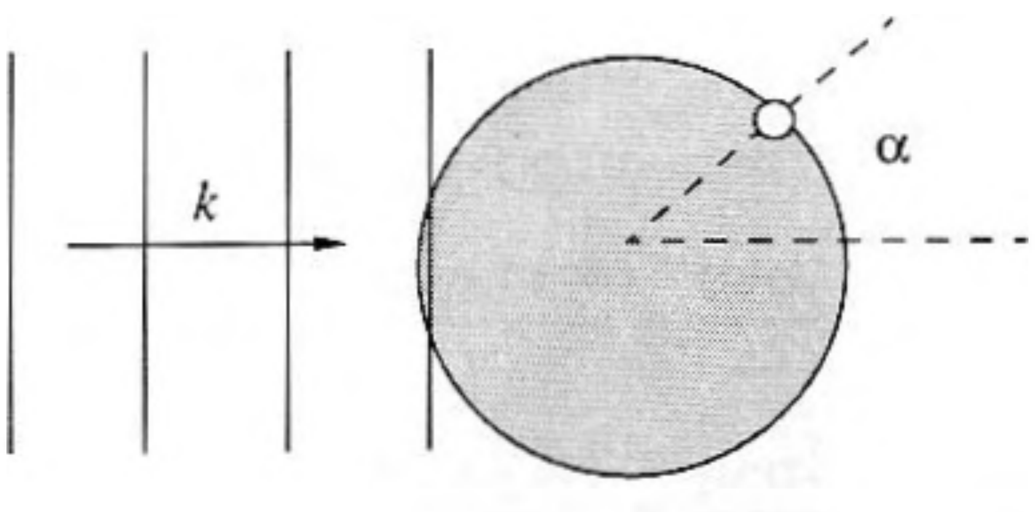

Рис. 1. Схема задачи.

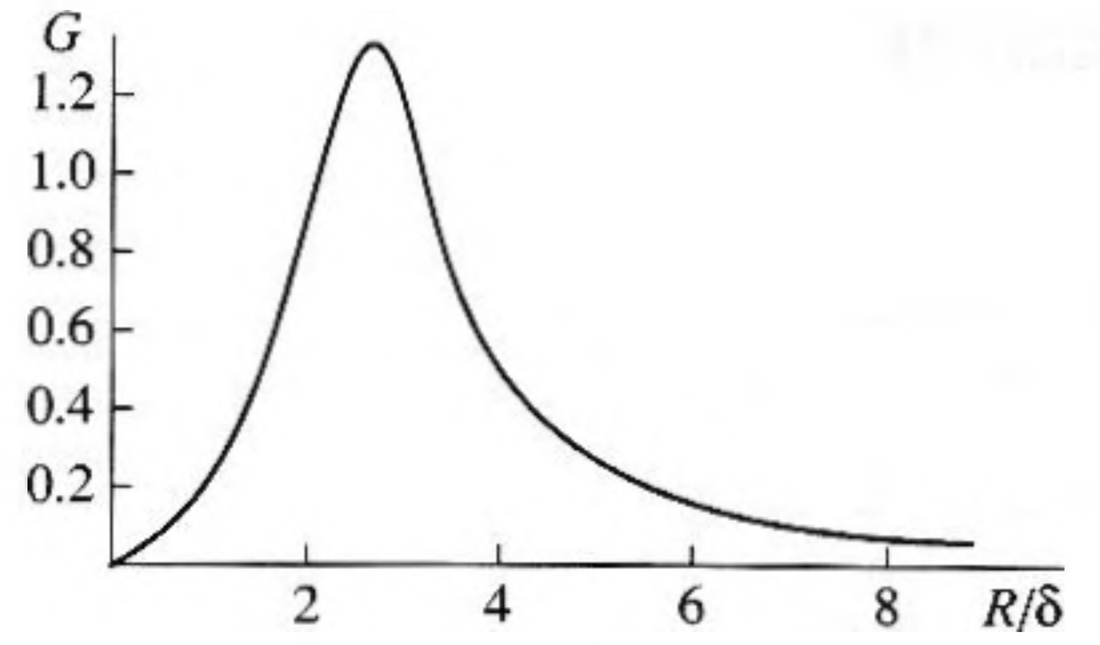

Рис. 2. Значение параметра G как функция отношения радиуса частицы к толщине вязкого погранслоя.

m и моментом инерции $J = (2/5)mR^3$ из-за присутствия на ее поверхности довеска массы (Δm), $p(t)$ – амплитуда давления в звуковой волне, k – волновое число, ρ – плотность жидкости, $\delta(\omega) = \sqrt{2\nu/\omega}$ – толщина осциллирующего пограничного слоя (ОПС), ν – кинематическая вязкость жидкости; M_{fr} – момент сил вязкого трения при вращательных колебаниях шара [3].

Решая уравнение (1) для гармонического поля с частотой ω, получим следующее выражение для мощности вязких потерь при вращательных колебаниях частицы в акустическом поле:

$$W = -\frac{\omega\rho^2\sin^2\alpha}{2\rho C^2}V\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 b^2\frac{\gamma}{\gamma^2+\chi^2}, \qquad (2)$$

где

$$\gamma = \frac{3+6b+6b^2+2b^3}{1+2b+2b^2}, \quad \chi = 2b^2\frac{4+3b-2b^2}{1+2b+2b^2},$$

$V = (4/3)\pi R^3$ – объем частицы, $\Delta\rho$ – избыток плотности вещества частицы над ее средней плотностью, C – скорость звука.

Рассмотрим теперь дополнительное затухание звука в среде, содержащей множество таких частиц. Если концентрация частиц в среде n, то полная мощность потерь связана с интенсивностью поля плоской волны I и коэффициентом затухания звука соотношением:

$$Wn = -\varepsilon I = -\varepsilon p^2/2\rho C.$$

Считая далее, что ориентации частиц равномерно распределены по всем направлениям, получим для коэффициента потерь выражение:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{2C}nV\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 G(R,\omega), \qquad (3)$$

где

$$G(R,\omega) = b^2\frac{\gamma}{\gamma^2+\chi^2}.$$

Параметр $G(R, \omega)$ характеризует эффективность развития таких вращательных движений частиц в акустическом поле данной частоты. Зависимость параметра G от безразмерного отношения $R/\delta(\omega)$ показана на рис. 2. Эта зависимость характеризуется максимумом при $R/\delta = 2.5$.

Таким образом, в данной работе предложен механизм вращательно-колебательных движений взвешенных в жидкости твердых частиц со смещенным центром масс в акустическом поле. Рассмотрена простая модель таких частиц в виде сфер с точечным довеском массы, для которой рассчитано дополнительное затухание звуковой волны за счет вязких потерь при угловых колебаниях частиц.

Сделаем оценку возможной величины эффекта. Для суспензии частиц в воде при следующих значениях параметров: $R = 25$ мкм, $nV = 0.01$, $\Delta\rho/\rho = 0.15$, $\nu = 10^{-6}$ м^2/с величина поглощения звука, обусловленного данным механизмом, составляет $\varepsilon \approx 6$ дБ/км на частоте 2.8 кГц и $\varepsilon \approx 10$ дБ/км на частоте 8 кГц. Дальнейшее изучение рассмотренного эффекта может оказаться полезным для интерпретации экспериментальных данных о распространении звука в различных суспензиях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (01-02-17653, 01-02-16938, 00-15-96741).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Релей*. Теория звука. Т. 1, 2. М.: Гостехиздат, 1955. (Rayleigh, The Theory of Sound, Dover, New York, 1945).
2. *Исакович М.А.* Теоретические основы акустики. М.: Наука, 1973. 495 с.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 730 с.