

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ГЕТЕРОГЕННО-ДИСПЕРСНЫХ ОСАДКАХ

© 2013 г. И. С. Кольцова, М. А. Дейнега, А. С. Полухина

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Физический факультет

E-mail: mv12.86@mail.ru

Поступила в редакцию 03.11.2012 г.

Впервые экспериментально показано, что при осаждении множества неконсолидированных частиц возможно образование гетерогенно-дисперсного слоя, в котором при прохождении ультразвуковых волн возникают стоячие волны. Время формирования слоя из множества частиц имеет непосредственную связь с индивидуальными свойствами диспергированной фазы и дисперсной среды. Исследования проводились на частоте ультразвуковых волн 3 МГц. В качестве диспергированной фазы были взяты частицы крахмала и Al_2O_3 , а дисперсными средами были вода и раствор глицерина.

Ключевые слова: скорость, ультразвуковые волны, частота, резонанс, размер частиц, концентрация.

DOI: 10.7868/S0320791913030076

Распространение низкочастотных акустических волн в осадках изучалось в многочисленных работах гидроакустиков [1–4]. Распространение ультразвуковых волн в гетерогенно-дисперсных осадках до настоящего времени не исследовалось, по всей вероятности, из-за большого поглощения и соответственно малой дальности распространения ультразвука в них.

При изучении концентрационной зависимости скорости распространения ультразвуковых волн во взвешах интерференционным методом [5–8] было обнаружено возникновение стоячих волн в осадках. Исследования проводились на интерферометре, пьезодатчики которого были расположены вертикально относительно друг друга. Ультразвуковые волны возбуждались на частоте 3 МГц. Акустическая ячейка заполнялась жидкостью: водой или раствором глицерина, которые играли роль матрицы. Скорость ультразвуковых волн в жидких матрицах измерялась стандартным интерферометрическим методом: путем перемещения одного из датчиков относительно другого и фиксирования положения узлов при возникновении стоячей волны [8]. Схема установки представлена на рис. 1. Измеренные скорости в жидких матрицах совпадали с табличными данными с точностью до 0.1%. Затем расстояние между датчиками фиксировалось на некотором неизменном расстоянии друг от друга, и в акустическую ячейку вносились частицы диспергированной фазы. В качестве диспергированной фазы были выбраны частицы крахмала ($\rho = 1.13 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$) и Al_2O_3 ($\rho = 2.69 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$).

Если гетерогенно-дисперсный слой неконсолидированных частиц способен резонировать, то при достижении толщины слоя, равной $\lambda/2$, в нем должна возникнуть стоячая ультразвуковая волна. Проведенные исследования показали, что при фиксированном положении датчиков по мере оседания частиц из матрицы на нижний датчик на экране осциллографа появлялись интерференционные максимумы и минимумы стоячих ультразвуковых волн как функции времени. На рис. 2 представлены осциллограммы появления интерференционных минимумов ($t_{i\min}$) и максимумов ($t_{i\max}$) при оседании частиц крахмала в воде.

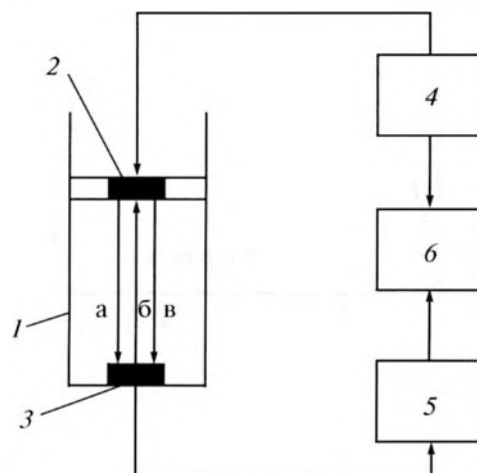


Рис. 1. Блок-схема установки. 1 – кювета; 2, 3 – пьезодатчики; 4 – генератор; 5 – приемник УЗВ; 6 – осциллограф; а, б, в – прямая и отраженные от кварцев 2 и 3 волны.

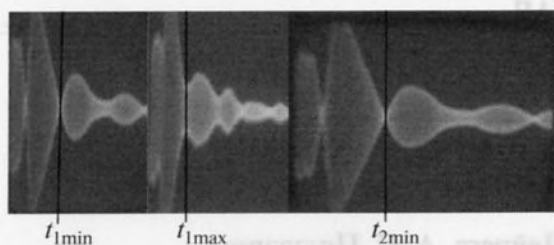


Рис. 2. Осциллограммы появления интерференционных минимумов ($t_{1\min}$) и максимумов ($t_{1\max}$) при оседании частиц крахмала в воде.

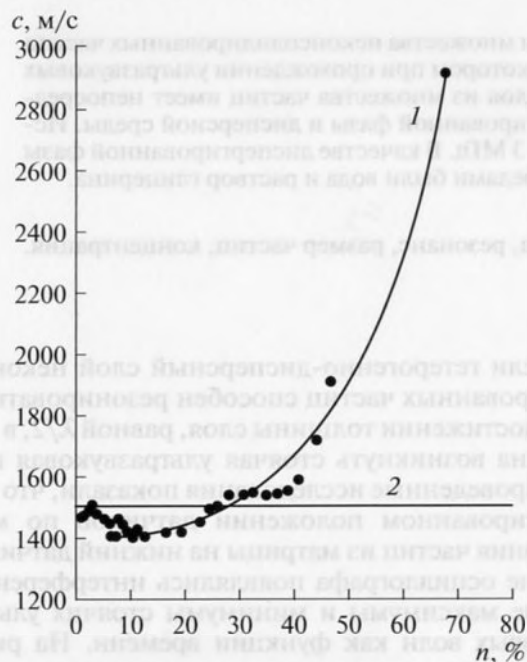


Рис. 3. Концентрационная зависимость скорости распространения ультразвуковых волн во взвеси крахмальных частиц (1), скорость ультразвуковых волн в воде (2).



Рис. 4. Схема прохождения ультразвуковых волн через гетерогенный слой.

Для того чтобы доказать возможность резонанса в гетерогенно-дисперсном слое, были проведены измерения концентрационной зависимости скорости ультразвуковых волн во взвесах крахмальных частиц. Экспериментальные данные представлены на рис. 3. Полученные данные позволили определить волновые сопротивления гетерогенных слоев и оценить коэффициенты отражения O_p и прохождения P_p по давлению акустической волны через границы: жидкость—слой, слой—пьезодатчик. На рис. 4 приведена схема прохождения ультразвуковых волн через гетерогенный слой. Коэффициенты отражения и прохождения ультразвуковых волн через границы раздела рассчитывались по формулам [9]:

$$O_p = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \quad P_p = \frac{2z_2}{z_2 + z_1}, \quad (1)$$

где z_1 — волновое сопротивление среды, из которой падает волна, z_2 — сопротивление среды, в которую проходит волна. Волновое сопротивление гетерогенного слоя рассчитывалось по экспериментально измеренной скорости звука в слое $c_{\text{сл}}$ и по его эффективной плотности $\langle \rho \rangle$:

$$z = \langle \rho \rangle c_{\text{сл}},$$

$$\langle \rho \rangle = (1 - n)\rho_{\text{ж}} + n\rho_{\text{ч}}, \quad (2)$$

где n — концентрация диспергированной фазы, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частиц.

Расчеты показали, что коэффициент отражения ультразвуковых волн через границу жидкость—гетерогенный слой крахмальных частиц $O_p \approx 0.4$, следовательно, ультразвуковая волна проникает в гетерогенный слой (луч 3 на рис. 4). Коэффициент отражения от границы гетерогенный слой—пьезодатчик $O_p \approx 0.7$ (луч 5 на рис. 4), следовательно, амплитуда давления в отраженной волне соизмерима с амплитудой давления в гетерогенном слое [10]. Таким образом, при равенстве частот и разности фаз возможна интерференция этих волн в слое, т.е. возникновение стоячей волны. Добротность гетерогенного слоя с учетом поглощения ультразвуковых волн в слое, рассчитывалась по формуле:

$$Q = \frac{\pi}{\theta} \approx 2, \quad (3)$$

где θ — декремент затухания [11].

Расчеты для гетерогенного слоя частиц Al_2O_3 дали значения для коэффициентов отражения, прохождения и добротности такого же порядка, как и для гетерогенного слоя частиц крахмала. Такого же порядка добротность наблюдалась при резонансном излучении гетерогенной пьезопленки в работе [12].

Проведенные оценки коэффициента прохождения и отражения ультразвуковых волн при про-

хождении слоя, его добротности, позволяют сделать предположение о возможности резонанса гетерогенно-дисперсного слоя неконсолидированных частиц.

Динамика появления интерференционных минимумов при оседании частиц крахмала в водной матрице представлена на рис. 5а, а на рис. 6а — динамика появления интерференционных минимумов при оседании частиц алюминия в растворе глицерина. Как видно из графиков, кривые динамики появления интерференционных минимумов подобны друг другу.

Из рис. 5а видно, что при оседании частиц крахмала в водной матрице время образования каждого последующего резонансного слоя увеличивается. Аналогичная ситуация наблюдается для частиц Al_2O_3 , оседающих в растворе глицерина. При анализе рис. 5а и 6а видно, что время появления максимумов и минимумов стоячих волн при седиментации крахмальных и Al_2O_3 частиц заметно отличается друг от друга. Очевидно, что время появления интерференционных минимумов и максимумов определяется скоростью седиментации частиц взвеси. Следовательно, можно решать обратную задачу: по времени появления интерференционных минимумов и максимумов определять константу седиментации [13]:

$$S_{\text{сед}} = \frac{U}{g}, \quad (4)$$

где U — скорость седиментации, g — ускорение свободного падения.

Кривые динамики появления интерференционных минимумов в гетерогенно-дисперсных слоях осадка идентичны кривым седиментации, получаемым с помощью торсионных весов. Это не удивительно, так как при оседании частиц взвеси на пьезодатчик, так же как и на чашечку торсионных весов, масса осадка увеличивается со временем по тем же законам седиментации [14].

Известно, что при условии независимости движения каждой частицы равномерное оседание частиц в жидкости происходит при равенстве сил седиментации $F_{\text{сед}} = v(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})g$ и сил трения, которые определяются по формуле Стокса $F_{\text{тр}} = 6\pi\eta rU$. Здесь v — объем, $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частицы, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность дисперсной среды, g — ускорение свободного падения, η — вязкость дисперсной среды, r — размер частицы. Скорость седиментации для частицы массой m с учетом поправки на выталкивающую силу по закону Архимеда определяется следующим образом:

$$U = \frac{mg}{6\pi\eta r} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ч}}},$$

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{ч}}.$$

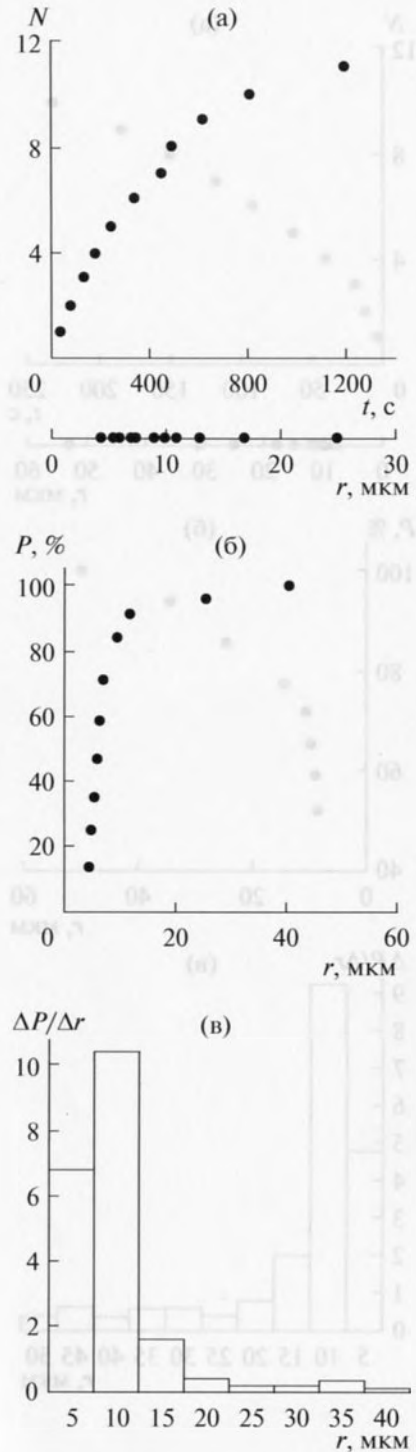


Рис. 5. (а) — Динамика появления интерференционных минимумов при оседании частиц крахмала в воде. N — номер интерференционного минимума, t — время, r — размер частиц; (б) — интегральная дисперсионная кривая частиц крахмала, оседающих в воде, P — процентное соотношение масс отдельных фракций частиц крахмала, оседающих в воде; (в) — дифференциальная дисперсионная кривая (гистограмма) частиц крахмала, $\Delta P/\Delta r$ — приращение процентного содержания частиц крахмала для каждого интервала размеров Δr .

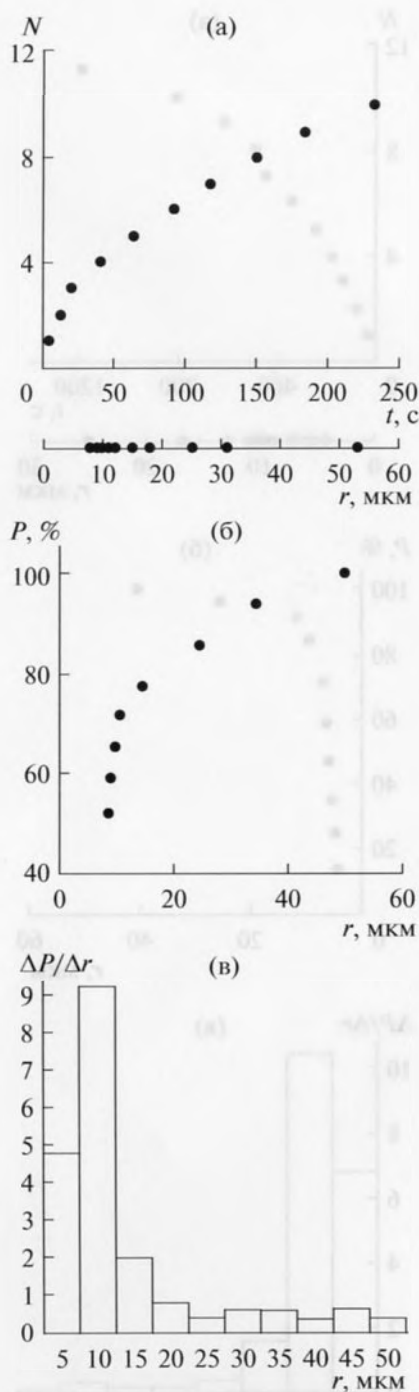


Рис. 6. (а) – Динамика появления интерференционных минимумов при оседании частиц Al_2O_3 в глицерине, N – номер интерференционного минимума, t – время, r – размер частиц; (б) – интегральная дисперсионная кривая частиц Al_2O_3 , оседающих в растворе глицерина, P – процентное соотношение масс отдельных фракций частиц Al_2O_3 , оседающих в растворе глицерина; (в) – дифференциальная дисперсионная кривая (гистограмма) частиц Al_2O_3 , $\Delta P/\Delta r$ – приращение процентного содержания частиц Al_2O_3 для каждого интервала размеров Δr .

Учитывая выражение для $U = H/t_i$, где H – высота, с которой падает частица, t_i – время формирования i -го резонансного слоя, получаем формулу для определения размеров частиц, формирующих соответствующий резонансный слой:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta H}{2g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})t_i}} \quad (5)$$

На рис. 5а и 6а приведена параллельно оси времени ось размеров, на которую нанесены размеры частиц, рассчитанные по формуле (5) для соответствующего резонансного слоя.

Массу каждого резонансного слоя M_i можно определить по формуле:

$$M_i = \frac{\lambda}{2} \pi R^2 \langle \rho \rangle, \quad (6)$$

где λ – длина волны ультразвуковых волн, R – радиус пьезодатчика. Сопоставив массу каждого резонансного слоя с размером частиц, формирующих соответствующий резонансный слой, можно получить интегральные дисперсионные кривые $P = f(r_i)$, представленные на рис. 5б, 6б.

По интегральной кривой седиментации, полученной акустическим методом, можно построить дифференциальную кривую распределения частиц полидисперсной системы по размерам (гистограмму) стандартным графическим методом: по оси абсцисс откладываются значения радиусов, а по оси ординат отношение приращения массовых долей к разности радиусов частиц соседних фракций $\Delta P/\Delta r$.

На рис. 5в, 6в представлены соответствующие гистограммы, построенные по интегральным кривым седиментации. Гистограммы, полученные акустическим методом, так же как и гистограммы, полученные по интегральной кривой седиментации с помощью торсионных весов, представляют собой распределение частиц диспергированной фазы по размерам их гидродинамических радиусов.

Таким образом, в работе впервые экспериментально показано, что при осаждении множества неконсолидированных частиц возможно образование гетерогенно-дисперсного слоя, способного к резонансному отклику при прохождении ультразвуковых волн. Время формирования геометрической формы множества имеет непосредственную связь с индивидуальными свойствами диспергированной фазы и дисперсной среды. Показана возможность акустического мониторинга процесса седиментации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. Основы и применение. М.: Мир, 1980. 590 с.

2. *Столл Р.Д.* Акустические волны в водонасыщенных осадках. В кн. Акустика морских осадков. М.: Мир, 1977. С. 28.
3. *Robb G.B.* The frequency dependence of compressional wave velocity and attenuation coefficient of intertidal marine // J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 120. № 5. P. 2526–2537.
4. *Buckingham M.J.* On the acoustic field in a Pekeris waveguide with attenuation in the bottom half // J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 119. № 1. P. 123–142.
5. *Мукел М.* Затухание ультразвуковых волн во взвешях в широком диапазоне концентраций // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 3. С. 362–366.
6. *Дятлова Е.Н., Мукел М.* Экспериментальное исследование скорости ультразвуковых волн в дисперсных системах // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 1. С. 52–55.
7. *Зиновьева Е.Н., Михалев А.Б.* Скорость ультразвуковых волн в феррокомпозитах // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 4. С. 1–5.
8. *Кольцова И.С.* Распространение ультразвуковых волн в гетерогенных средах. С.-Петербург, 2007. С. 245.
9. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
10. *Шутилов В.А.* Основы физики ультразвука. Л.: ЛГУ, 1980. 280 с.
11. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: ИЛ, 1956. 726 с.
12. *Голямина И.П., Пирогов В.А., Расторгуев Д.Л., Суриков Б.С.* Ультразвуковые излучатели на основе полимерной пленки для воздушной среды // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 200–205.
13. *Кольцова И.С., Дейнега М.А., Полухина А.С., Кольцова Ю.С.* Ультразвуковой способ определения гранулометрического состава дисперсных материалов // Патент РФ, решение о выдаче № 2011131599 от 27.07.2012.
14. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1989. 463 с.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрос интерес исследователей к изучению акустических волн в средах с дисперсным составом. Это связано с тем, что в таких средах распространение волн имеет ряд особенностей, отличающихся от волн в сплошных средах. В частности, в дисперсных средах наблюдается дисперсия скорости звука, что приводит к изменению фазового соотношения волн при их распространении. Это явление имеет важное значение для многих областей науки и техники, в частности для акустики, геофизики, медицины и др. В настоящее время активно ведутся исследования по созданию устройств, способных измерять скорость звука в дисперсных средах. Одним из таких устройств является ультразвуковой датчик, который позволяет измерять скорость звука в жидких, твердых и газообразных средах. В настоящее время широко используются ультразвуковые датчики для измерения скорости звука в жидких средах. Однако измерение скорости звука в твердых и газообразных средах является более сложной задачей. В настоящее время активно ведутся исследования по созданию устройств, способных измерять скорость звука в твердых и газообразных средах. Одним из таких устройств является ультразвуковой датчик, который позволяет измерять скорость звука в жидких, твердых и газообразных средах. В настоящее время широко используются ультразвуковые датчики для измерения скорости звука в жидких средах. Однако измерение скорости звука в твердых и газообразных средах является более сложной задачей. В настоящее время активно ведутся исследования по созданию устройств, способных измерять скорость звука в твердых и газообразных средах. Одним из таких устройств является ультразвуковой датчик, который позволяет измерять скорость звука в жидких, твердых и газообразных средах.