

УДК 534.8

## ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ВО ВЗВЕСЯХ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ

© 1997 г. И. С. Кольцова, Мукел Майсун

Санкт-Петербургский университет, кафедра физики твердого тела  
198904 Санкт-Петербург, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 12.02.96 г.

В работе представлены результаты экспериментального исследования дополнительного коэффициента затухания ультразвуковых волн на частотах 1 и 3 МГц во взвесах стеклянных частиц в воде в широком диапазоне концентраций. Проведенные исследования показали, что по изменению концентрационного коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн можно получать информацию о структурных перестройках во взвесах.

Взвеси в дисперсном и пористом состоянии – интереснейшие объекты исследований, обладающие многофункциональными свойствами, позволяющими решать с их помощью разнообразные задачи, связанные с научными исследованиями и техническими применениями. Теория распространения акустических волн во взвесах в области малых концентраций частиц создавалась Рэлеем, Лэмбом, Исковичем, Ратинской-Чабан, Рытовым, Аллегро, Хавлей и др. [1–6], в области высоких концентраций – Био, Чабан [7–12].

В идеализированной модели взвесь при малой концентрации представляется в виде жидкой матрицы, в которой хаотично распределены изолированные друг от друга изотропные частицы, имеющие форму сфер с одинаковыми или отличающимися друг от друга размерами. Учитываются инерционные, упругие, тепловые свойства частиц и жидкости. Предполагается, что когда расстояние между частицами  $r_{mn}$  превышает их размеры ( $r_{mn} \gg 2R$ ), то взаимодействие между акустической волной и конкретной частицей не зависит от наличия других частиц в матрице. При облучении ультразвуком на границе частица–матрица возбуждаются тепловые, вязкие, рассеянные, продольные и сдвиговые волны, распространяющиеся в матрице и в частице соответственно.

С увеличением концентрации частиц, когда их объемная доля начинает превышать 20%, во взвесах возникают кластерные образования, которые при дальнейшем увеличении концентрации, соединяясь в бесконечные кластеры, создают квазипористую структуру осадков [13, 14]. Меняется роль твердой и жидкой фаз в гетерогенной системе. Твердые частицы становятся матрицей, а жидкость заполняет поры между ними. Под действием акустической волны происходит деформация матрицы, возникают микропотоки в порах.

Важным параметром становится соотношение размера пор и длины волны.

Известные теории распространения акустических волн в пористых телах основаны на предположении, что эффективный размер пор  $\alpha$  намного меньше длины волны, распространяющейся в пористом теле, а их число в пространстве, соизмеримом с длиной волны, достаточно большое, чтобы к пористым телам можно было применять модель микронеоднородных сред [7–12].

До настоящего времени нет единой теории, по которой можно было бы рассчитать или качественно предсказать ход концентрационной кривой дополнительного коэффициента затухания  $\Delta\alpha$  во всем диапазоне изменения концентрации частиц во взвесах. Экспериментальные работы, за исключением [15], ограничивались измерениями  $\Delta\alpha$  в области малых концентраций, например, [6, 16, 17].

Целью нашего исследования является изучение концентрационной зависимости дополнительного коэффициента затухания  $\Delta\alpha$  ультразвуковых волн при изменении объемной концентрации частиц  $n\%$  об. от малой, когда отсутствует взаимодействие между частицами, до больших величин, при которых диспергированная фаза образует бесконечные кластеры пористого осадка.

В качестве объектов для исследования концентрационной зависимости затухания ультразвуковых волн во взвесах нами были выбраны взвеси стеклянных частиц. Стеклянные шарики были получены распылением расплавленного стекла в сверхзвуковой струе [18].

Выбранные объекты давали возможность провести сравнение полученных экспериментальных данных с существующими теориями, так как для компонентов взвесей известны все физические параметры, необходимые для теоретических расчетов [19]. Значения этих параметров приведены в таблице.

Таблица

Свойство Вещество	Плотность $\rho \times 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Сжимаемость $\epsilon \times 10^{-11}$ , Па <sup>-1</sup>	Скорость $c$ , м/сек	Вязкость $\eta \times 10^{-3}$ , Па сек	Теплопроводность $k$ , Вт/м К	Теплоемкость $C_p \times 10^{-2}$ , Дж/Кг К	Кoeff. теплового расширения $\beta \times 10^{-4}$ , К <sup>-1</sup>
Вода	0.998	4.56	1482	1.12	0.63	41.9	1.82
Стекло	2.32	0.237	5350 2800		1.34	6.3	$2.82 \times 10^{-2}$

Размеры стеклянных сфер определяли с помощью микроскопа МБИ. Для построения гистограмм измерялись размеры 1000 частиц. По гистограмме определялся средний размер радиуса частиц  $\bar{R} = 12$  мкм, диапазон изменения радиусов  $R \in 10 \sim 70$  мкм.

Измерения коэффициента затухания на частотах 1 и 3 МГц проводились импульсным методом [20]. Результаты измерений представлены соответственно на рис. 1, 2.

На рис. 1 приведена известная кривая концентрационной зависимости дополнительного затухания ультразвуковых волн при частоте 1 МГц, полученная Уриком [15] во взвесах кварцевого песка, средний размер частиц  $\bar{R} = 1$  мкм (кривая 1). Как видно из графиков, концентрационная зависимость  $\Delta\alpha$ , полученная в наших измерениях (кривая 2) и для взвесей кварцевого песка в области малых концентраций, линейная. Однако наши

данные значительно отличаются от результатов, полученных Уриком в области концентраций, превышающих 10–15%. Во взвесах кварцевого песка на графике концентрационной зависимости  $\Delta\alpha$  в области 10% наблюдается ярко выраженное отклонение от линейной зависимости. Кривая  $\Delta\alpha = f(n)$  достигает максимального значения при концентрации 10–15%, затем с ростом концентрации величина дополнительного коэффициента затухания ультразвуковых волн начинает уменьшаться. Автор высказал предположение, что отклонение от линейности и уменьшение  $\Delta\alpha$  с ростом концентрации частиц в области концентраций, превышающих 10–15%, связано с взаимодействием между частицами, не обсуждая механизмов увеличения “проводимости” ультразвуковых волн.

Для уточнения механизмов, определяющих изменение коэффициента  $\Delta\alpha$  с ростом концентрации стеклянных частиц, в наших измерениях был значительно уменьшен шаг изменения концент-

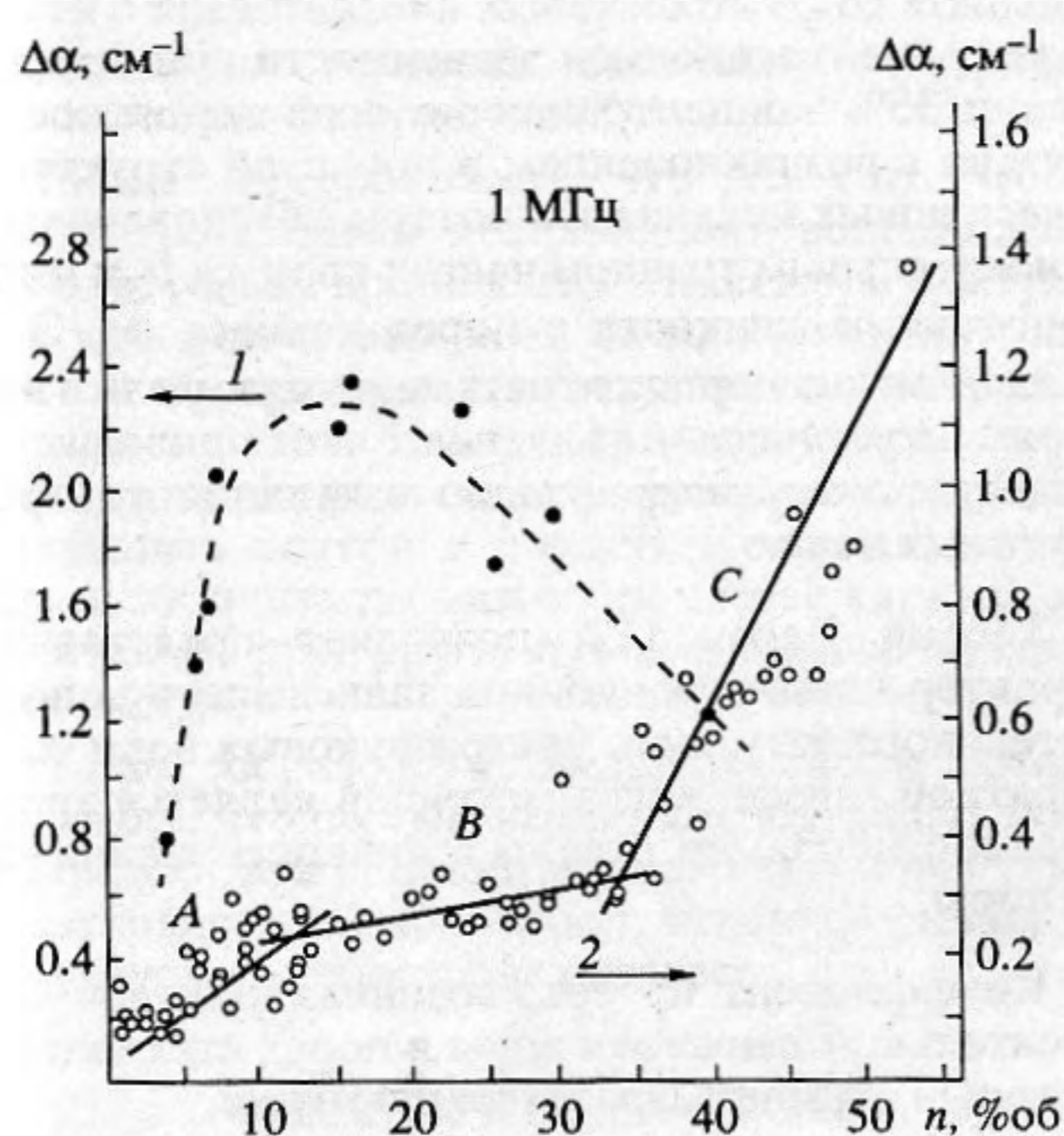


Рис. 1. Зависимость  $\Delta\alpha$  от концентрации частиц во взвесах: 1 – песка, 2 – стеклянных шариков при  $\nu = 1$  МГц.

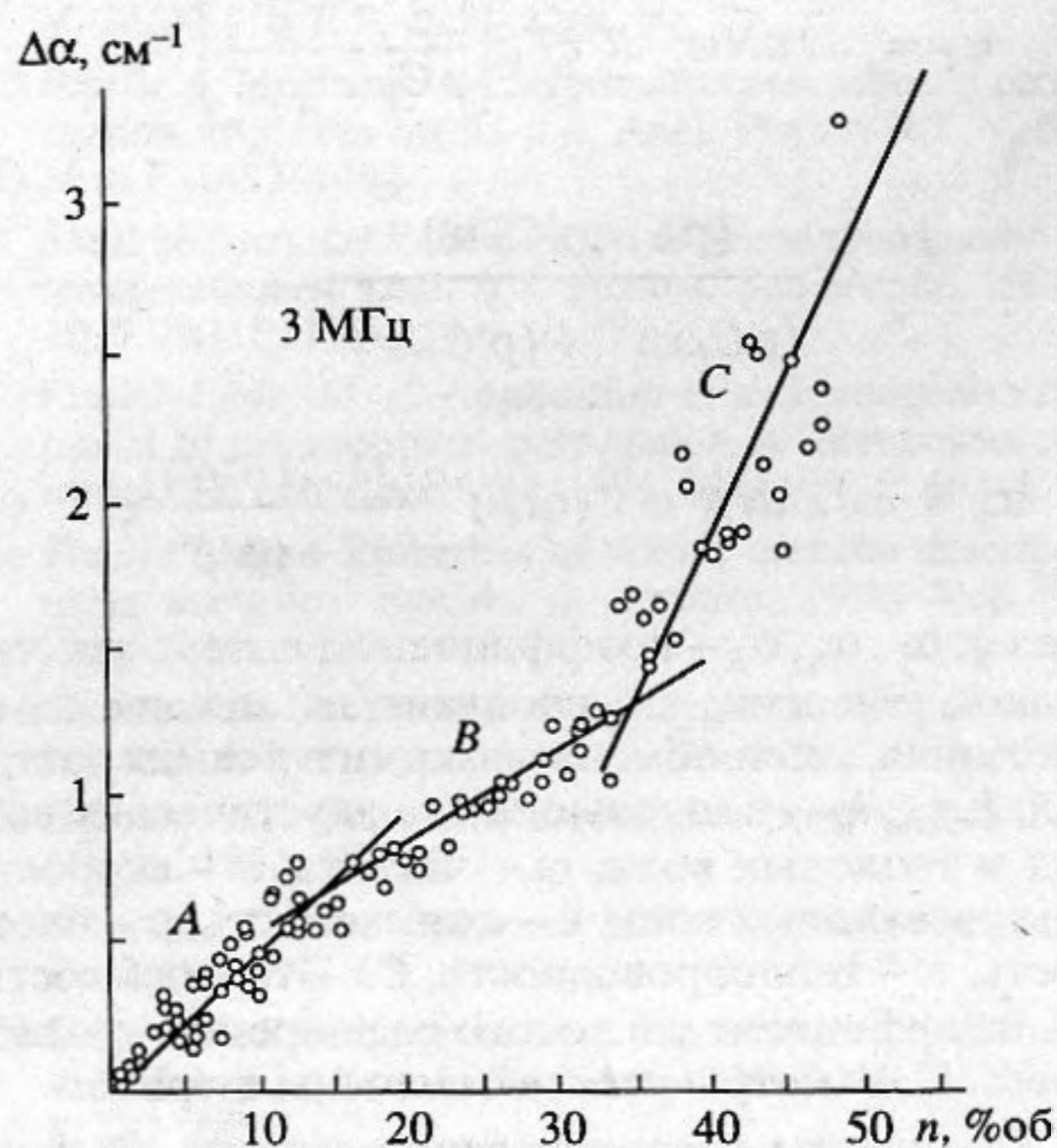


Рис. 2. Зависимость  $\Delta\alpha$  от концентрации частиц стеклянных шариков при  $\nu = 3$  МГц.

рации по сравнению с измерениями во взвеси кварцевого песка. Он не превышал 1%. Большое внимание уделялось воспроизводимости результатов. Коэффициент дополнительного ослабления измерялся при каждой концентрации не менее 10 раз. Варьировалось время измерения: часть измерений проводилась в один день, другая на следующий день или через несколько суток.

Проведенные измерения дополнительного коэффициента затухания ультразвуковых волн при частотах 1 и 3 МГц во взвесах стеклянных частиц показали, что с ростом концентрации частиц во всех областях концентраций вплоть до состояния осадка  $\Delta\alpha$  увеличивается. Однако характер зависимости концентрационной кривой при переходе через области концентраций 10–15% и 30–35% изменяется.

В области малых концентраций экспериментальные данные сравнивались с теоретическими. В этой области теория распространения акустических волн во взвесах предполагает все виды потерь аддитивными и дополнительный коэффициент затухания представляется в виде:

$$\Delta\alpha = \alpha_S + \alpha_T + \alpha_\eta + \alpha_R. \quad (1)$$

Коэффициенты потерь, учитывая, что  $kR < 1$ ,  $k_\eta R > 1$ ,  $k_T R > 1$  рассчитывались по следующим формулам:

$$\alpha_S = \frac{2}{3}\pi N k^4 R^6 \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{\epsilon - \epsilon'}{\epsilon} \right)^2 + \left( \frac{\rho' - \rho}{2\rho' + \rho} \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$\alpha_T = \sqrt{2}\pi N \omega^{1/2} R^2 c T \rho \left( \frac{\beta}{\rho C_P} - \frac{\beta'}{\rho' C'_P} \right)^2 \times \frac{(\rho C_P k \rho' C'_P k')^{1/2}}{(\rho C_P k)^{1/2} + (\rho' C'_P k')^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\alpha_\eta = 6\sqrt{2}\pi N R^2 \omega^{1/2} (\eta/\rho)^{1/2} \frac{1 - (\rho/\rho')^2}{c [2 + (\rho/\rho')]^2}, \quad (4)$$

где  $\alpha_S$ ,  $\alpha_T$ ,  $\alpha_\eta$ ,  $\alpha_R$  – коэффициенты потерь акустической энергии, обусловленные механизмами рассеяния, теплообмена, вязкими и в самих частицах,  $k$ ,  $k_\eta$ ,  $k_T$  – волновые числа акустических вязких и тепловых волн,  $\omega$  – частота,  $c$  – скорость ультразвуковых волн,  $\epsilon$  – сжимаемость,  $\rho$  – плотность,  $k$  – теплопроводность,  $C_P$  – теплоемкость,  $\beta$  – коэффициент теплового расширения,  $\eta$  – вязкость. Параметры стекла отмечены штрихом.

Результаты теоретических расчетов по формулам (1–4) представлены на рис. 1, 2 прямыми А. Как видно из рис. 1, 2, они удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Та-

ким образом, в области малых концентраций, где расстояния между частицами превышают размеры частиц  $r_{mn} > R$ , теория и эксперимент показывают простую линейную зависимость между  $\Delta\alpha$  и концентрацией частиц во взвеси, которую можно представить в виде  $\frac{\partial \Delta\alpha}{\partial n} = C$ .

При превышении 10–15% концентрации во взвесах возникает взаимодействие между частицами, начинается процесс образования дискретных кластерных структур [13, 14]. Как видно из графиков, представленных на рис. 1, 2, характер концентрационной кривой  $\Delta\alpha$  при переходе в область концентраций, превышающих 10–15%, заметно меняется:  $\frac{\partial \Delta\alpha}{\partial n} < C$ . Можно предположить, что это изменение связано со структурными изменениями во взвесах. При этом уменьшение потерь акустической энергии возможно за счет механизма рассеяния вследствие того, что часть частиц может оказаться в зоне тени кластерных образований.

При превышении 35% концентрации перкаляционная теория предсказывает образование частицами взвеси бесконечных кластеров, создающих пористую структуру [13]. Как видно из графиков, представленных на рис. 1, 2, при концентрации частиц более 30–35% характер концентрационной зависимости дополнительного коэффициента затухания ультразвуковых волн опять меняется:  $\frac{\partial \Delta\alpha}{\partial n} > C$ . Такое изменение хода концентрационной зависимости при превышении 35% концентрации по всей вероятности связано с возникновением в пористой структуре взвеси новых механизмов потерь, обусловленных относительным трением частиц каркаса  $\alpha_f$  и микротоками жидкости в порах каркаса  $\alpha_E$ . Эти механизмы начинают играть заметную роль в потерях акустической энергии, что приводит к существенному возрастанию затухания ультразвуковых волн.

Теория Чабан [12] позволяет представить характер концентрационной зависимости дополнительного затухания ультразвуковых волн  $\alpha_E$  в обратной взвеси, когда матрицей является твердое тело, например, стекло, а жидкость заполняет ее поры.

Коэффициент потерь, возникающий при относительном движении воды в порах стеклянной матрицы, рассчитывается по формуле:

$$\alpha_E = \frac{\omega}{c} E \frac{(\rho' - \rho)^2}{2\rho'\rho} \operatorname{Im} F(\omega\tau), \quad (5)$$

где

$$F(\omega\tau) = 1 + \frac{\sqrt{2}(1+i)[\text{ber}_1(\sqrt{\omega\tau}) + i\text{bei}_1(\sqrt{\omega\tau})]}{(\sqrt{\omega\tau})[\text{ber}_0(\sqrt{\omega\tau}) + i\text{bei}_0(\sqrt{\omega\tau})]}$$

$$\tau = \frac{a^2 \rho}{\eta}$$

$E = \frac{V_{\text{пор}}}{V}$  – пористость,  $\text{ber}_n, \text{bei}_n$  – функции Томсона.

Полученные экспериментальные данные и теория Чабан позволяет построить обобщенный график зависимости  $\Delta\alpha$  от концентрации во всем диапазоне изменения концентрации твердой фазы от нуля до 100%, представленный на рис. 3. Из графика видно, что если в области концентраций (1) от 0 до 10–15%, в области существования изолированного и относительно равномерного распределения частиц, принять  $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial n} = C$ , то в области концентраций (2) от 15–20% до 35–40%  $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial n} < C$ .

Это область возникновения дискретной кластерной структуры во взвесах, где возникают двойные или тройные контакты между частицами. При концентрации частиц, превышающей 40% в области возникновения пористой структуры взвеси, где число контактов частиц возрастает до шести, значение концентрационного коэффициента дополнительного ослабления заметно возрастает:  $\frac{\partial\Delta\alpha}{\partial n} > C$ . На графике это область 3. В области 5 представлена зависимость  $\alpha_E$  от концентрации воды в порах стеклянной матрицы, вычисленная по формуле (5).

Можно предположить, что для того чтобы концентрационный коэффициент дополнительного затухания прошел через максимум и затухание ультразвуковых волн начало уменьшаться с ростом концентрации твердой фазы во взвеси и попало в область 5 линейной зависимости от концентрации воды в порах, нужно существенно уменьшить потери в пористых осадках, например, исключить подвижности частей каркаса относительно друг друга, путем спекания стеклянных частиц.

Таким образом, проведенные исследования показали, что по изменению концентрационного коэффициента дополнительного затухания ультразвуковых волн можно получать информацию о структурных перестройках взвеси.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Rayleigh J.W. Investigation of the Distur. band. Prod. by a Spher. Obst. on Waves of Sound. // Math. Soc. Proc. 1872. P. 253–283.

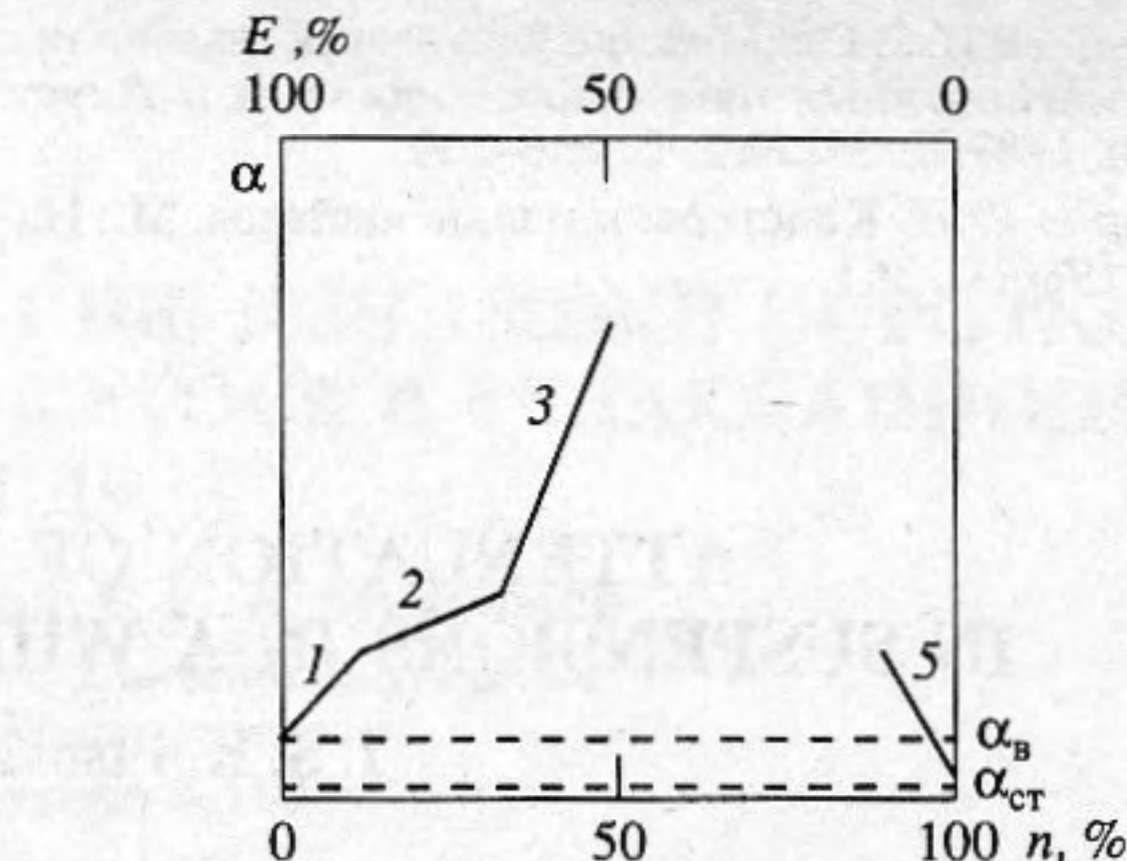


Рис. 3. Обобщенный график зависимости коэффициента ослабления ультразвуковых волн от концентрации твердой фазы.

2. Рытов С.М., Владимирский В.В., Галанин М.Д. Распространение звука в дисперсных системах // ЖЭТФ. 1938. Т. 8. № 5. С. 614–621

3. Исакович М.А. О распространении звука в эмульсиях // ЖЭТФ. 1948. Т. 18. № 10. С. 905–912.

4. Ратинская И.А. О затухании звука в эмульсиях // Акуст. журн. 1962. Т. 8. № 2. С. 210–215.

5. Epstein P.S. On the Absorption of sound waves by suspensions and emulsions // Applied Mechanics. Theodore von Karman anniversary Volume. 1941. P. 162–187.

6. Allegra J.R., Hawley S.A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments // Jour. Acoust. Soc. Amer. 1971. V. 51. № 5. P. 1545–1564.

7. Biot M.A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media // J. Acoust. Soc. Amer. 1962. V. 34. № 9. p 1. P. 1254–1264.

8. Biot M.A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. № 4. P. 1482–1498.

9. Shotiros Nicholas P. Biot model of sound propagation in water-saturated sand. // J. Acoust. Soc. Amer. 1995–1997. №1. P. 199–214.

10. Poujol-Pfefer M.-F. Application of an homogenization model to the acoustical propagation in inhomogeneous media. // J. Sound and Vibr. 1995. 184. № 4. P. 665–679.

11. Teuber Sabine. Properties of porous material described using acoustical models. // Acustica. 1996. Vol. 82. Suppl. №1. P. 585.

12. Чабан И.А. Затухание звука в грунтах и горных породах // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 2. С. 362–369.

13. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982. С. 175.

14. Кольцов С.И., Рослякова Н.Г. Пористые вещества. Л., 1987. С. 66.

15. Urick R.J. Absorption of Sound in Suspension of Irreg. Particles // J. Acoust. Soc. Amer. 1948. V. 20. № 3. P. 283–288.

16. Кольцова И.С. Рассеяние и поглощение ультразвуковых волн в гетерогенных системах // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 2. С. 271–273.

17. Кольцова И.С. Ослабление ультразвуковых волн в немагнитных магнитных жидкостях // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 2. С. 256–260.
18. Петров Ю.И. Кластеры и малые частицы. М.: Наука, 1986, С. 367.
19. Физические величины. Справочник под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, С. 1232.
20. Мак-Скимен Г. Ультразвуковые методы измерения механических характеристик жидкостей и твердых тел. Физическая акустика. Ред. У. Мэзон. 1966. Т. 1.4А. С. 327–393.

## ATTENUATION OF ULTRASONIC WAVES IN SUSPENSIONS IN A WIDE CONCENTRATION RANGE

I. S. Kol'tsova, Mucel Maysun

Results are the experimental studies of the additional attenuation coefficient (AAC) on 1 and 3 MHz frequency in suspensions of glass particle in a wide range of concentrations. Additional attenuation is the attenuation observed for water. Nominal values for the mean particle radius are estimated as 12 micron. Experimentally observed AAC versus volume concentration from 0.1 to 55% is depicted in the figures. These data were taken as volume concentration were increased with top 10–15% and 35–40% with a significant transformation of the acoustic transmittivity. Experimental data provide an discussion of additional attenuation mechanisms of the ultrasonic wave in suspensions of glass particles with increased volume fraction. This work has shown that experimental data consist with theories of Rayleigh, Epstein, Isakovich, Biot, Chaban. It is shown that information of the structural rearrangements in suspensions can be obtained from AAC variations.