

## НИЗКОЧАСТОТНАЯ РЕЗОНАНСНАЯ ДИСПЕРСИЯ ЗВУКА В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕДАХ

### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментальных исследований распространения низкочастотного звука в газожидкостных средах, подтверждающие существование предсказанной теоретически низкочастотной резонансной дисперсии звука, связанной с резонансом деформационно-поступательных колебаний пузырьков.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Динамика газожидкостных пузырьков сред, подверженных виброакустическим воздействиям, в значительной мере определяется процессом гидродинамического взаимодействия жидкости и содержащихся в ней пузырьков газа. Из-за колебательного движения пузырьков относительно жидкости эффективные динамические свойства (виброплотность и вибровязкость) пузырьков сред могут отличаться от статических свойств [1, 2].

В ряде работ авторов [3-5] на основе концепции эффективных динамических свойств были получены зависимости для эффективной динамической плотности гетерогенных сред различных типов. В частности, виброплотность дисперсной газожидкостной среды, образованной идеальной жидкостью и недеформируемыми сферическими пузырьками, выражается формулой

$$\frac{\rho^*}{\rho} = \frac{1-\phi}{1+2\phi}. \quad (1)$$

Если содержащая пузырьки жидкость обладает вязкостью, то эффективная динамическая плотность является комплексной величиной, действительная часть которой определяет собственно инерционность, а мнимая отвечает за диссипативные потери при поступательных (трансляционных) колебаниях среды. Таким образом, кроме эффективной динамической плотности  $\rho^*$  вводится эффективная трансляционная вязкость (вибровязкость)  $\eta^*$ . Оба динамических свойства дисперсных сред зависят как от свойств компонентов (плотности и вязкости жидкости, объемной концентрации и формы включений), так и от частоты вибрационных воздействий.

При колебаниях пузырьков относительно жидкости со скоростью  $W$  кроме инерционного взаимодействия, связанного с присоединенной массой, на их поверхности возникает распределение давления, вызывающее деформацию сферических пузырьков в эллипсоиды [4]:

$$\frac{p(\theta)}{\rho} = \frac{W^2}{16}(\cos 2\theta - 1). \quad (2)$$

Поскольку силы поверхностного натяжения препятствуют изменению формы пузырьков, то при периодических поступательных колебаниях возникают колебания формы.

На основе анализа поступательных колебаний жидкости с деформируемыми пузырьками авторами были теоретически получены резонансные зависимости эффективных динамических свойств пузырьков сред от частоты, приведенные на рис.1.

Существование резонансных особенностей на частоте  $\omega_2/2$ , где  $\omega_2^2 = \frac{12\sigma}{\rho R^3}$  - собственная частота колебаний пузырьков по второй сферической форме, было подтверждено в экспериментах по вибрациям труб с газожидкостной средой [5-7].

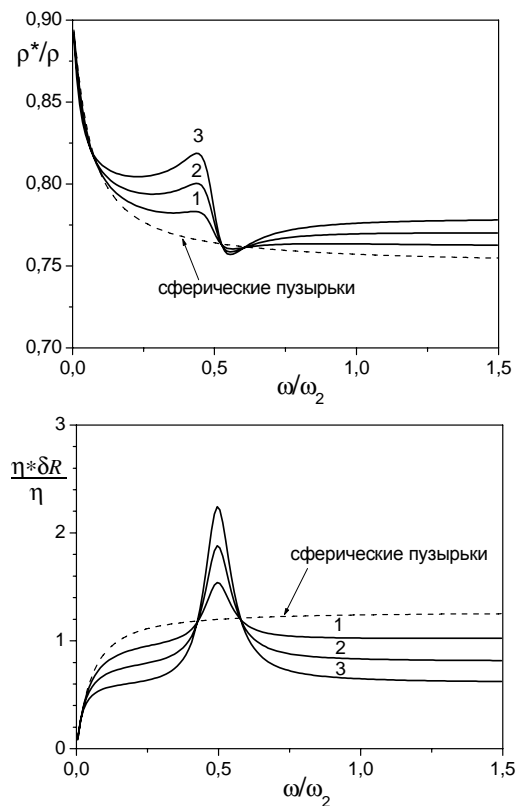


Рис. 1. Зависимость виброплотности и вибровязкости от частоты при различных амплитудах колебательной скорости пузырьковой среды  $U_0$ : 1 – 0.1 м/с; 2 – 0.15 м/с; 3 – 0.2 м/с

## 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЖИДКОСТИ С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ ПУЗЫРЬКАМИ

Динамический процесс распространения волн давления в пузырьковых средах, как и в однородных средах, определяется физико-механическими и термодинамическими свойствами. В случае распространения низкочастотных волн, длина которых существенно превышает характерный масштаб неоднородности пузырьковой среды (размер пузырьков, расстояние между ними), а характерные амплитуды колебательного движения среды существенно меньше размеров пузырьков, для описания волнового процесса пузырьковую среду целесообразно рассматривать как псевдооднородный континуум. Такая среда характеризуется рядом эффективных динамических свойств, некоторые из которых (виброплотность и вибровязкость) рассмотрены выше.

Поскольку скорость распространения звука определяется инерционностью и сжимаемостью среды, то резонансные особенности эффективной динамической плотности должны привести к резонансной дисперсии скорости звука, связанной с резонансом деформационно-поступательных колебаний пузырьков. Характерный вид дисперсионной зависимости скорости и затухания звука, полученный в [7], показан на рис. 2

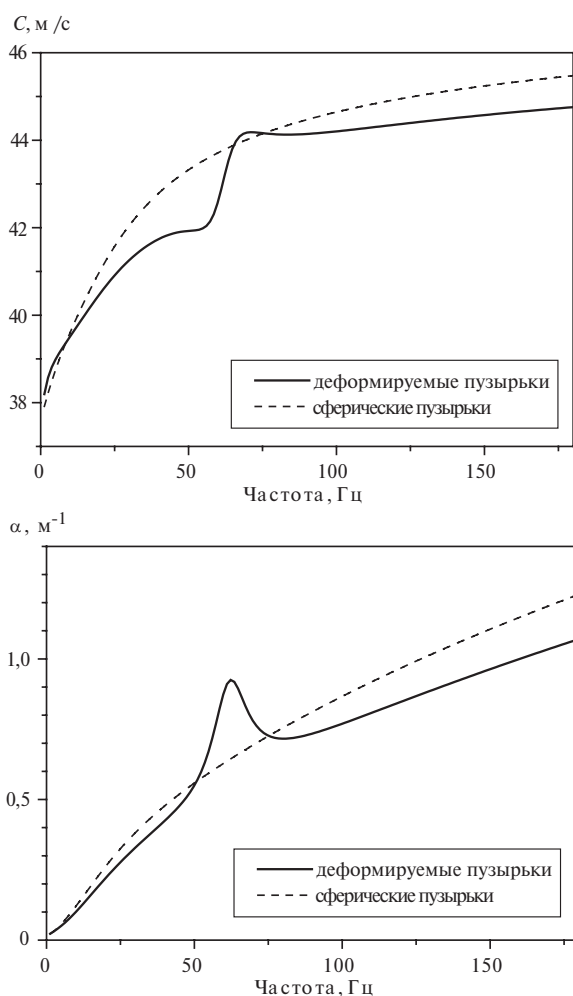


Рис. 2. Теоретические зависимости скорости распространения и коэффициента затухания звука

Таким образом, кроме известной дисперсии звука, связанной с резонансом объемных осцилляций пузырьков, было предсказано существование резонансной дисперсии, обусловленной резонансом сфероидальных колебаний пузырьков, которую мы будем называть низкочастотной.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования проводились методом стоячих волн. Установки и методики измерений подробно описаны в [9-11].

На рис. 3 приведены результаты акустических измерений, полученные в водоспиртовых растворах ( $\rho=990$  кг/м<sup>3</sup>,  $\eta=1.01$  мПа·с,  $\sigma=0.05$  Н/м [6]) с пузырьками азота радиусом 1.1 мм.

Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретическими зависимостями как по скорости звука, так и по коэффициентам затухания. Из рисунков видно уменьшение измеренных значений скорости звука в диапазоне 30–60 Гц по сравнению с результатами расчетов для недеформируемых пузырьков (пунктирные линии), наличие локального максимума коэффициента затухания на частотах 60–70 Гц.

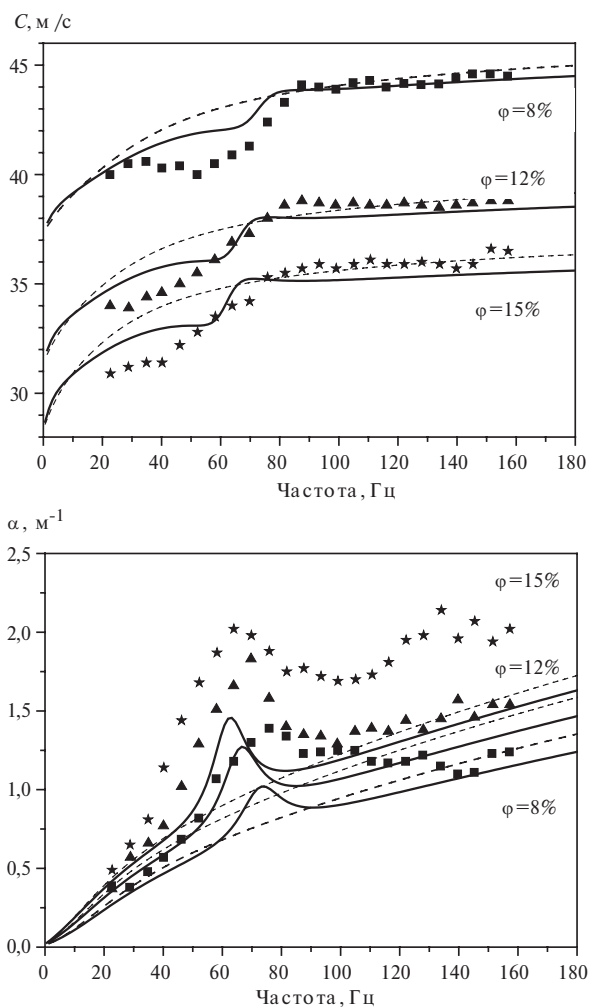


Рис. 3. Экспериментальные зависимости скорости звука и коэффициента затухания от частоты (спиртовой раствор)

Для изучения влияния свойств несущей жидкости (плотности, вязкости) на характер резонансной дисперсии звука проводились также эксперименты с растворами глицерина в воде.

На рис. 4 представлены результаты акустических измерений в 40%-ном растворе глицерина (вязкость 3 мПа·с). Видно, что увеличение вязкости несущей жидкости привело к сглаживанию резонансных особенностей, что согласуется с теорией (сплошные линии).

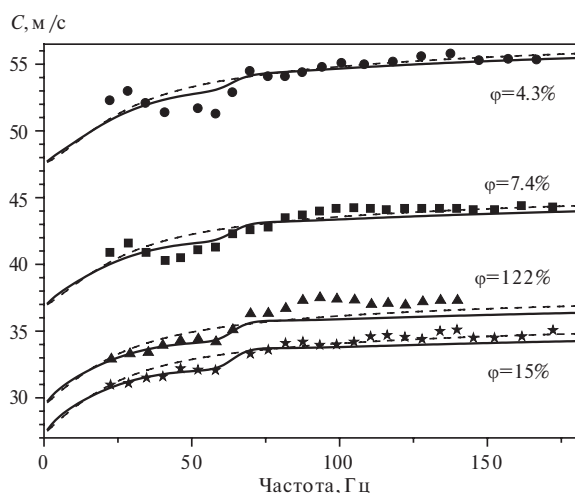


Рис. 4. Экспериментальные зависимости скорости звука от частоты (раствор глицерина 40%)

В газожидкостной смеси, где несущая жидкость обладает высокой вязкостью 37 мПа·с (раствор глицерина 70%), резонансные особенности полностью исчезли (см. рис. 5). В 70%-ном растворе при барботаже газа вверху смеси образовывался слой пены толщиной до 2-3 см, что затрудняло определение высоты смеси и соответственно контроль газосодержания. По-видимому, это и явилось причиной расхождения теоретических и экспериментальных данных, представленных на рис. 5.

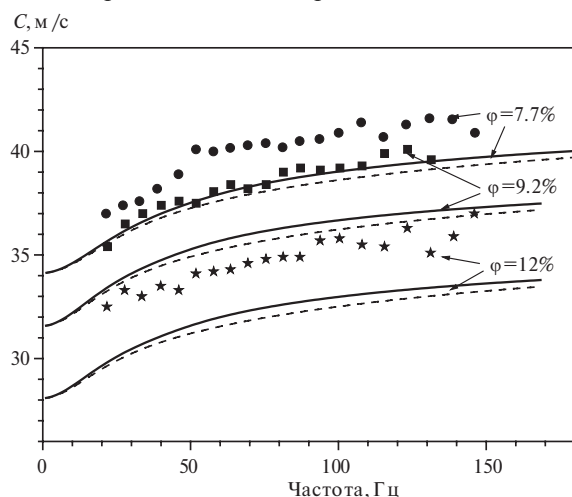


Рис. 5. Экспериментальные зависимости скорости звука от частоты (раствор глицерина 70%)

На рис. 6 представлены примеры зависимостей скорости звука и коэффициента затухания от частоты при близких значениях газосодержания (8.8 и 8.9%), но при разных размерах пузырьков в смеси.

Видно, что уменьшение размера пузырьков приводит к повышению частоты резонанса.

Проводились также тесты на повторяемость результатов. На рис. 7 приведены результаты измерений, выполненных в водно-спиртовом растворе с интервалом в несколько дней. Систематическое снижение значений скорости, полученных при повторных измерениях, связано с неточностью задания газосодержания. Однако эти расхождения не превышают погрешности измерений.

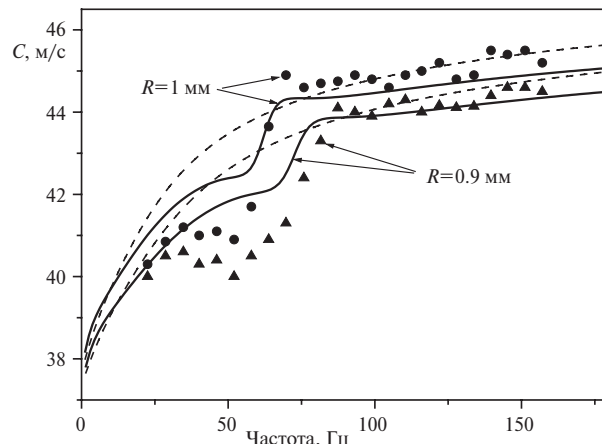


Рис. 6. Зависимость скорости звука и коэффициента затухания от частоты при двух различных радиусах пузырьков (газосодержание 8.9%). Смесь: водоспиртовой раствор – газ

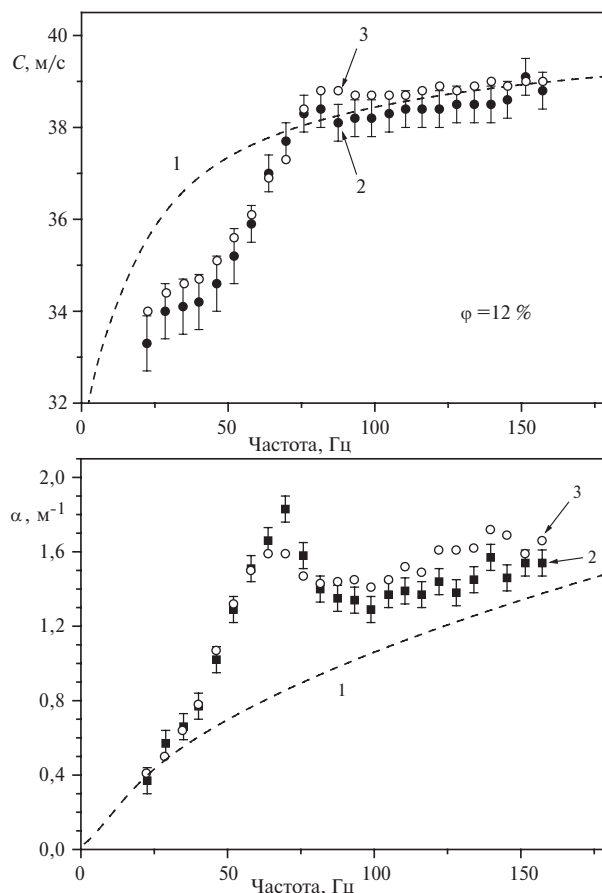


Рис. 7. Скорость и коэффициент затухания звука: 1 – расчет для сферических пузырьков; 2, 3 – экспериментальные данные двух серий измерений

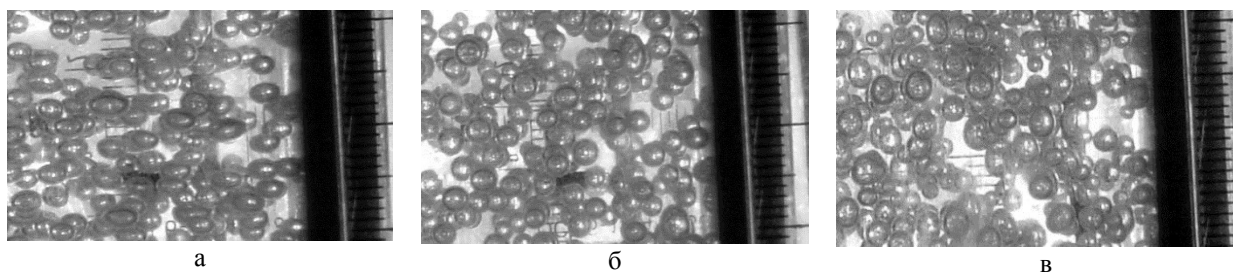


Рис. 8. Газожидкостная смесь в различных фазах акустической волны

Для иллюстрации процесса резонансных деформационных колебаний пузырьков в стоячей акустической волне, играющего согласно теории основную роль в резонансной дисперсии звука, на рис. 8 приведены фотографии, полученные в разных фазах звуковой волны при частоте воздействия 60 Гц. Видно, что пузырьки изменяют свою форму от сплюснутых (а) до вытянутых (в) в вертикальном направлении эллипсоидов. В некоторый промежуточный момент пузырьки в основном сферические (б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные, подтверждающие теоретически предсказанное явление низкочастотной резонансной дисперсии звука, обусловленной резонансом поступательно-деформационных колебаний пузырьков в жидкости.

Приведенные результаты экспериментальных исследований по скорости и затуханию звука согласуются с полученными ранее теоретическими зависимостями.

Экспериментально показано, что частота, на которой наблюдается резонансная дисперсия звука, зависит от размера пузырьков. Показано также, что увеличение вязкости жидкости приводит к сглаживанию резонансных особенностей дисперсионной зависимости скорости и затухания низкочастотного звука.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и администрации г. Обнинска (проект № 05-02-96720).

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$C$  – скорость звука, м/с;  
 $p$  – давление, Н/м<sup>2</sup>;  
 $R$  – радиус пузырьков, м;  
 $U$  – скорость среды, м/с;  
 $W$  – относительная скорость пузырьков, м/с;  
 $\alpha$  – коэффициент затухания, 1/м;  
 $\delta$  – толщина пограничного слоя, м;  
 $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\varphi$  – объемное газосодержание;  
 $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с;  
 $\omega$  – циклическая частота, 1/с.

Индексы:

**0** – амплитудное значение;  
**2** – вторая сферическая форма;  
**\*** – эффективные величины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Блехман И.И.** Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400 с.
2. **Гранат Н.Л.** Установившиеся колебания сосудов с двухфазной смесью // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1964. № 5. С. 3–25.
3. **Федотовский В.С.** Концепция эффективных динамических свойств гетерогенных систем при виброакустических воздействиях // Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Труды Межд. конференции. Обнинск, 1998. Т.1. С. 215–220.
4. **Lamb H.** Hydrodynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 1932.
5. **Fedotovskiy V.S., Vereshchagina T.N., Terenik L.V.** On vibrations of tubes filled with a bubbly medium // Actual problems of aviation and aerospace systems: processes, models, experiment. 2004. V. 9. № 2. P. 84–103.
6. **Fedotovskiy V.S., Vereshchagina T.N., Terenik L.V.** Dynamics of bubble media under vibration // Two-phase flow modelling and experimentation. Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Symp. Pisa, 2004. P. № ven35.
7. **Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенев А.В., Прохоров Ю.П.** Экспериментальные исследования резонансной дисперсии низкочастотного звука в газожидкостных средах // Тр. Регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга: Полиграф-Информ, 2005. С. 88–104.
8. **Федотовский В.С., Прохоров Ю.П., Верещагина Т.Н.** Динамическая плотность и скорость распространения волн давления в дисперсных средах // Теплоэнергетика. 2001. Т. 48, № 3. С. 70–74.
9. **Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенев А.В.** Акустика газо-жидкостных сред // Тр. XV школы-семинара молодых ученых «Проблемы гидродинамики и теплообмена в энергетических установках». Калуга. 2005. Т.1. С. 285–288.
10. **Fedotovskiy V.S., Vereshchagina T.N., Derbenev A.V.** Experimental Research of Resonance Sound Dispersion in Bubbly Media // Fluxes and structures in fluids-2005. Selected papers / IPM RAS. Moscow. 2006.
11. **Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенев А.В.** Распространение низкочастотного звука в пузырьковых средах // Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах. Тез. межотр. конф. Обнинск. 2005. С. 189–191.