

УДК 534.222

## НИЗКОЧАСТОТНАЯ РЕЗОНАНСНАЯ ДИСПЕРСИЯ ЗВУКА В ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ\*

В.С. ФЕДОТОВСКИЙ, Т.Н. ВЕРЕЩАГИНА

ФГУП ГНЦ РФ — Физико-энергетический институт  
им. А.И. Лейпунского, Обнинск

Представлены результаты экспериментальных исследований по низкочастотной акустике газожидкостных пузырьковых сред, направленных на проверку теории резонансной дисперсии звука нового типа. Кроме хорошо известной высокочастотной дисперсии звука в газожидкостных средах, связанной с резонансом объемных осцилляций пузырьков и, соответственно, с резонансной сжимаемостью, согласно теории, должна существовать низкочастотная резонансная дисперсия звука, обусловленная резонансом связанных сфероидально-поступательных колебаний пузырьков и, соответственно, резонансом эффективной динамической плотности среды. Показано, что экспериментальные данные по скорости и коэффициенту затухания звука в пузырьковых средах подтверждают существование резонансной дисперсии, обусловленной связанными поступательно-деформационными колебаниями пузырьков.

Ранее авторами теоретически было показано, что при колебаниях газожидкостных сред движение пузырьков относительно жидкости может сопровождаться их периодической деформацией в сфероиды по форме второй сферической гармоники с удвоенной частотой. Поскольку сфероидальные колебания пузырьков-осцилляторов являются резонансными, то при частоте поступательных колебаний пузырьковой среды  $\omega$ , равной половине собственной частоты сфероидальных ко-

лебаний пузырьков  $\omega_2 = \left( \frac{12\sigma}{\rho R^3} \right)^{1/2}$  [3], возникают их интенсивные деформацион-

но-поступательные колебания, приводящие к резонансной зависимости эффективной динамической плотности среды [1, 2]. Поскольку скорость звука определяется как сжимаемостью, так и эффективной инерционностью или эффективной динамической плотностью, то из этого следует, что в газожидкостных средах пузырьковой структуры возможно существование резонансной дисперсии звука, связанной с резонансным взаимодействием поступательных и деформационных колебаний пузырьков (диполь-квадрупольное взаимодействие).

Результаты расчетов скорости распространения и коэффициента затухания звука по теоретической модели для воды, содержащей 8 % газа (азота), приведены на рис. 1. Здесь сплошными линиями показаны результаты расчетов, полученные для деформируемых в сфероид пузырьков радиусом  $R = 1$  мм, имеющих собственную частоту сфероидальных колебаний  $f_2 = \omega_2/2\pi \approx 120$  Гц. Пунктирными линиями показаны результаты расчетов для недеформируемых сферических пузырьков.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-02-96720) и Администрации г. Обнинска.

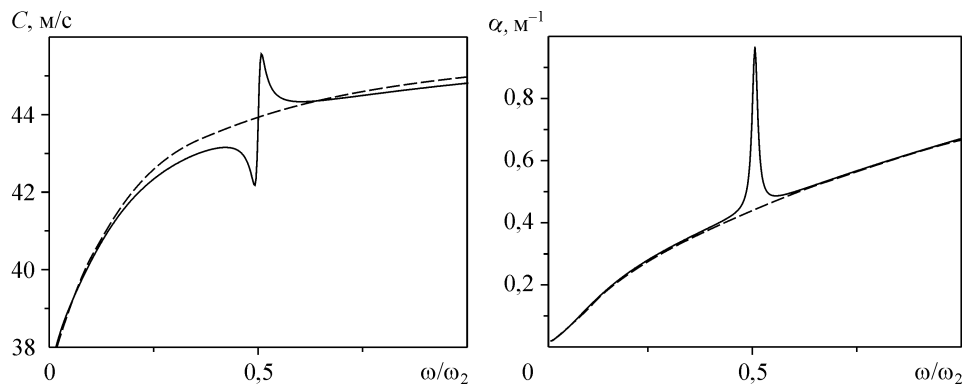
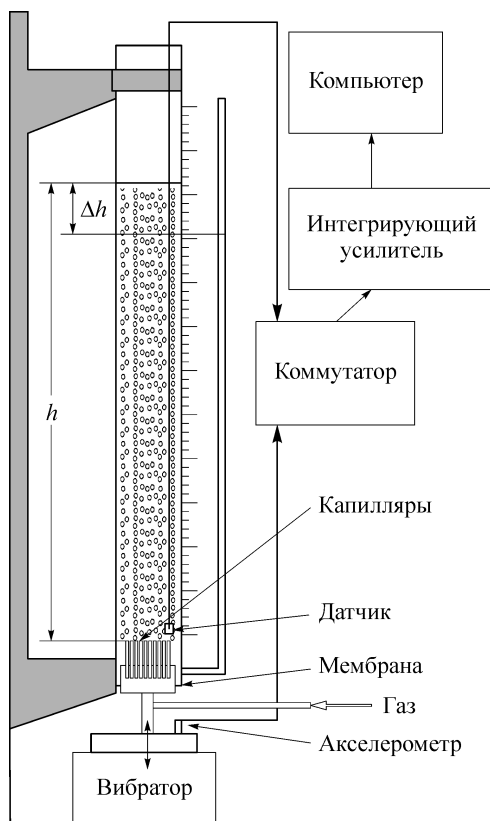


Рис. 1. Теоретические зависимости скорости распространения и коэффициента затухания звука в газожидкостной среде с малой вязкостью от частоты.

Таким образом, теория предсказывает, что, кроме хорошо известной высокочастотной дисперсии звука в газожидкостных средах, обусловленной резонансом объемных осцилляций пузырьков, должна существовать низкочастотная резонансная дисперсия звука, обусловленная резонансом сфероидаально-поступательных колебаний пузырьков.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по проверке теоретической модели распространения низкочастотного звука в пузырьковых средах. Эксперименты проводились на водноспиртовом растворе с пузырьками азота радиусом около 1 мм при объемных газосодержаниях  $\varphi = 0,08 \div 0,15$ .



Акустические исследования в газожидкостных пузырьковых средах проводились методом стоячих волн в стеклянной трубе диаметром 50 мм и высотой 3 м. В несущую жидкость через игольчатые капилляры вводились пузырьки газа. Содержание газа в смеси контролировалось объемным методом. Поршень, герметично связанный через резиновую мембрану с нижним основанием трубы, приводился в колебательное движение с помощью вибратора (рис. 2). В результате пульсации давления в виде монохроматической волны распространялись по высоте смеси и, отражаясь от границы с воздухом, складывались с исходной волной. Таким образом, в стоячей акустической волне формировалось распределение пульсаций давления по высоте смеси, которое измерялось передвижным датчиком пульсаций давления.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Для определения скорости звука в пузырьковой среде использовался метод стоячих волн, описанный в [4]. Параметры задаваемого воздействия (амплитуда и частота) контролировались с помощью акселерометра, установленного на платформе вибратора. Из полученных экспериментально распределений амплитуд пульсаций давления по высоте пузырьковой смеси определялась скорость распространения и коэффициент затухания звука на различных частотах.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные и теоретические зависимости [1, 2] для скорости распространения и коэффициента затухания звука от частоты, полученные в водно-спиртовом растворе с различным содержанием пузырьков газа. На рисунках пунктиром показаны теоретические зависимости, учитывающие вязко-инерционную и тепловую релаксации для недеформируемых сферических пузырьков [4–6].

Из сравнения видно, что теоретические зависимости качественно согласуются с экспериментальными данными. Резонансная дисперсия звука для газожидкостной

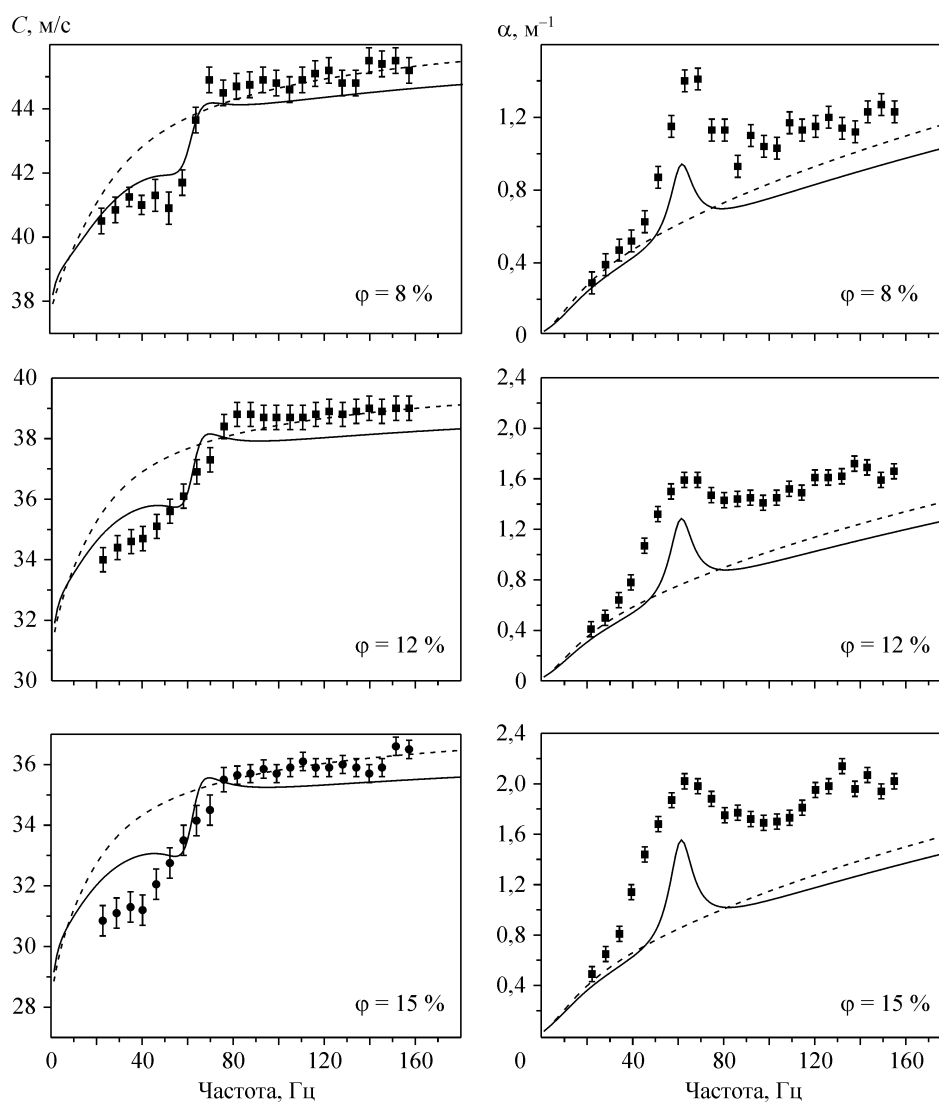


Рис. 3. Скорость и коэффициент затухания звука в водно-спиртовом растворе с различным газосодержанием  $\varphi$ .

Расчет по модели резонансной дисперсии (сплошные линии), расчет без учета деформации пузырьков (пунктирные линии), экспериментальные данные (точки).

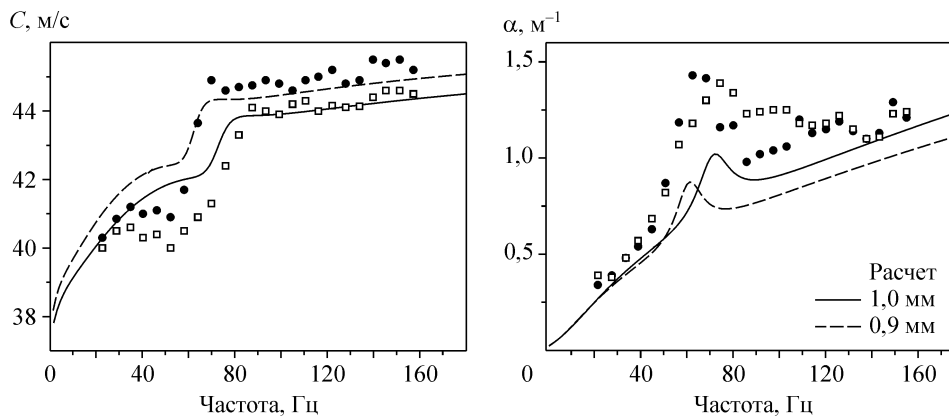


Рис. 4. Зависимости скорости и коэффициента затухания звука в газожидкостной среде от частоты в пузырьках газа разного размера.

Расчет для  $R = 0,9$  и  $1$  мм,  $\varphi = 8\%$  и  $8,2\%$  соответственно (сплошная и пунктирная линии), экспериментальные данные (точки).

среды с пузырьками радиусом около 1 мм имеет место при частоте волны 60 Гц, что составляет половину собственной частоты сферических колебаний пузырьков.

Резонансный максимум коэффициента затухания в этой области частот обусловлен возрастанием вязких потерь при резонансе деформационно-поступательных колебаний пузырьков.

Одним из главных параметров, определяющих частоту сферического резонанса, и, соответственно, область резонансной дисперсии, является радиус пузырьков  $R$ . В связи с этим области резонансной дисперсии звука, полученные при различных средних размерах пузырьков, смещаются по частоте. На рис. 4 представлен пример частотного смещения резонансной дисперсии скорости звука и коэффициента затухания при изменении размера пузырьков.

Таким образом, в отличие от хорошо известной резонансной дисперсии звука, обусловленной объемными осцилляциями пузырьков и, соответственно, резонансной зависимостью эффективной сжимаемости пузырьковой среды, экспериментально установлено существование низкочастотной резонансной дисперсии звука, связанной с резонансной зависимостью эффективной динамической плотности пузырьковой среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. — Vol. 9, No. 2. — P. 84–103.
2. Fedotovskiy V.S., Vereshchagina T.N., Terenik L.V. Dynamics of bubble media under vibration // Proc. of 3rd Int. Symp. on two-phase flow modeling and experimentation. — Pisa, 2004. — P. ven35 (CD) — 7 p.
3. Ламб Г. Гидродинамика. — М.:—Л.: Гостехиздат, 1947. — 928 с.
4. Silberman E. Sound velocity and attenuation in bubbly mixtures measured in standing wave tubes // J. Acoust. Soc. Am. — 1957. — No. 29. — P. 925–933.
5. Crum L.A., Prosperetti A. Nonlinear oscillations of gas bubbles in liquids: An interpretation of some experimental results // J. Acoustical Society America. — 1983. — Vol. 73, No. 1. — P.122–128.
6. Devin C. Jr. Survey of thermal, radiation and viscous damping of pulsating bubbles in water // J. Acoustical Society America. — 1959. — Vol. 31, No.12. — P. 1654–1667.

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2007 г.