

КЛАССИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ И ТЕОРИИ ВОЛН

УДК 532:529

ЗАТУХАНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ПЕНЕ

© 2016 г. В. Т. Фаерман

Department of Chemical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev

P.O.B. 653, Beer-Sheva, Israel

E-mail: vfaerman@gmail.com

Поступила в редакцию 28.01.2014 г.

Представлены экспериментальные измерения затухания звуковой волны в пене без добавок (методом стоячих волн) и в пене с добавлением частиц (импульсным методом). Разработана установка, позволяющая получить стоячую звуковую волну в стабильной пене и оценить коэффициент затухания. Проведено сравнение величин коэффициентов затухания звука в пене, опубликованных в ряде работ в звуковом и ультразвуковом диапазоне частот. Показано, что введение частиц в пену приводит к росту затухания звуковых волн и может быть обусловлено вязкостным механизмом потерь энергии звуковых волн.

Ключевые слова: затухание, стоячая звуковая волна, пена, ультразвук.

DOI: 10.7868/S0320791916010032

КРАТКИЙ ОБЗОР

Распространение звука в пене — газожидкостной среде — является объектом как теоретического, так и экспериментального исследования — см., например, [1–5]. Особое внимание уделяется изучению механизма затухания звука в пене. Так, например, Канн и др. [1] рассмотрели теоретически и получили экспериментальное подтверждение зависимости коэффициента затухания звука в пене от кратности, имеющей максимум $\alpha = 9 \text{ м}^{-1} = 13.7 \text{ дБ/м}$ при кратности $K = 60$. В своей ранней работе Мохоп и др. [2] рассматривали влияние кратности пены, размера пузырьков и добавления частиц в пену на затухание звука. При кратностях пены $K < 80$ ими было установлено, что затухание звука не зависит от размера пузырьков, при этом с ростом кратности наблюдается уменьшение затухания звука. При кратностях пены $K > 80$ затухание звука существенно зависит от размера пузырьков, причем при данной кратности пены затухание тем больше, чем больше размер пузырька. В обоих случаях с увеличением кратности пены затухание звука уменьшается. Автор объясняет полученный эффект, по крайней мере, двумя механизмами рассеяния звуковой энергии в пене на основе вязкостных потерь:

— движением жидкости между пузырьками при распространении звуковой волны в пене;

— потерями на трение при колебании пузырьков в звуковой волне.

Эти механизмы зависят от содержания жидкости в пене и от вязкости жидкости. Работа Феклистова и Шушкова [3] подтверждает общий вывод [2] о снижении затухания звука с увеличением

кратности пены. Авторы приводят следующие значения коэффициентов затухания звука: $\alpha = 6 \text{ м}^{-1} = 19.2 \text{ дБ/м}$ при кратности пены $K = 20$ и $\alpha = 4.5 \text{ м}^{-1} = 14.4 \text{ дБ/м}$ при $K = 90$. Что же касается Канны [1] и Феклистова [3], то используемая в этих работах пена на основе водных растворов сульфанола обладала периодом стабильности 6 минут. Raspet [4] приводит в своей работе значение коэффициента затухания 15 дБ/м при кратности $K = 30$. В то же время, Оренбах и др. [5] приводят экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что кратность пены K не влияет на затухание ($3.56\text{--}3.7 \text{ м}^{-1}$, или $11.4\text{--}11.8 \text{ дБ/м}$, в интервале кратностей $K = 18\text{--}40$). При анализе данных, связанных с затуханием звука в пене, содержащей частицы, налицо противоречие: Мохоп [2] утверждает, что введение частиц в пену способствует росту затухания звука и объясняет это преобладанием вязкостного механизма потерь, тогда как Феклистов и др. [3] утверждают обратное. Такое расхождение авторы объясняют тем, что при использовании ими акустического импульса, представленного частотами $100\text{--}800 \text{ Гц}$, минимальная длина волны соответствует $\lambda = 6 \text{ см}$, что намного больше размеров структурных элементов, составляющих пену. А следовательно, процессы, связанные с отражением звуковой волны от поверхности пузырьков газа, приводящие к рассеянию звуковой энергии, и вязкостные потери, которые происходят в результате вязкого трения отдельных пузырьков в процессе колебаний, не будут вносить, как утверждают авторы, значительного вклада в диссипацию энергии звуковой волны. Dekrasinski [6] для оценки затухания звука использовал формулу

$$\alpha = (A_2/A_1) = \exp(-(v/c^3)(f^2L)), \quad (1)$$

где A_1 – амплитуда входного сигнала, A_2 – амплитуда ослабленного сигнала, $\nu = (\mu/\rho)$, μ – вязкость жидкости, c – скорость звука, f – частота звука, L – расстояние, пройденное звуком в пене. Автор измерил затухание звука в разных пенах в ударной трубе, получив зависимость (A_2/A_1) как функцию $f^2 L \times 10^{-6}$. Например, на частоте 1 кГц для стабильной пены Shave (Gillette company) коэффициент затухания $\alpha = 28.8$ дБ/м ($K = 11...13$).

ЗВУКОВАЯ И УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АППАРАТУРА

В экспериментах были использованы звуковой и ультразвуковой генераторы на частотах 20 кГц (потребляемая мощность 450 Вт, Vibra Cell 450, Sonic and Materials, Danbury) и 40 кГц (потребляемая мощность 50 Вт, разработанный для ферритового магнестрикционного преобразователя).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В связи с вышеизложенным представляло интерес провести измерения коэффициента затухания звука в пене, обладающей стабильностью, методом стоячих волн [7] (непрерывный режим излучения с фиксированной частотой $f = 1.2$ кГц). Указанный метод позволяет надежно зафиксировать распределение максимумов и минимумов вдоль трубки, в которой распространяется звуковая волна, и определить коэффициенты затухания звука. Для эксперимента была выбрана пена Gillette foam Shave regular кратностью $K = 11...13$ (далее – “пена Shave”). Такой выбор пены обусловлен ее уникальной стабильностью по сравнению с пенами, которые использовали другие авторы. Так, например, в работе Mujica [8] указано, что плотность пены Shave ($\rho = 0.076 \pm 0.005$ г/см³), которая определяет газосодержание, не изменяется в течение первых двух часов. Эта особенность пены Shave позволила нам идентифицировать стоячую волну, т.к. время эксперимента в нашем случае не превышало 20 минут. Такая же марка стабильной пены использована в экспериментах Dekrasinski [6].

На рис. 1 показана установка 1, в которой в качестве датчика давления используется гидрофон 8103 (Brüel & Kjaer) 3. Перед началом эксперимента гидрофон помещается в стаканчик 4 с пеной 5 таким образом, чтобы весь гидрофон был погружен в пену в верхней части стаканчика. Геометрические размеры трубки 2 и стаканчика 4 выбраны так, чтобы в трубке и в стаканчике возникла плоская стоячая волна согласно следующим условиям [7]:

$$f < 0.586c/d \tag{2}$$

или

$$d < 0.586\lambda, \tag{3}$$

$$l > (3\lambda/4) + d, \tag{4}$$

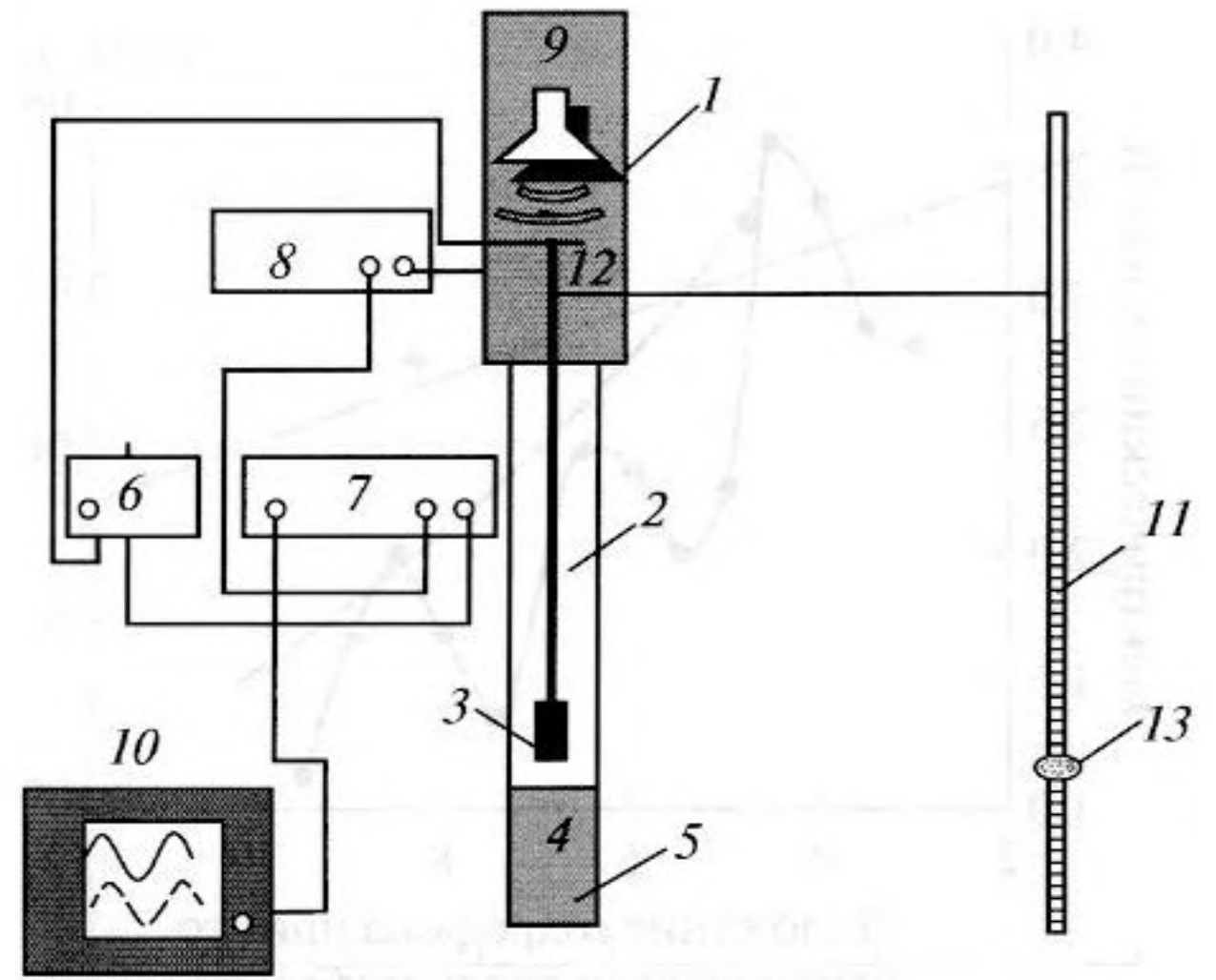


Рис. 1. Установка для изучения затухания звука в пене: 1 – источник звука; 2 – трубка; 3 – гидрофон; 4 – стаканчик с пеной 5; 6 – усилитель; 7 – осциллограф; 8 – задающий генератор; 9 – камера; 10 – компьютер; 11 – линейка; 12 – звуковая волна; 13 – фиксатор.

где f – частота колебаний звука, Гц; c – скорость звука в среде, м/с; d – диаметр трубки (стаканчика), м; λ – длина волны при данной частоте, м; l – длина трубки (стаканчика), м.

Соотношения (2)–(4) являются эмпирическими, найденными экспериментально на основе правила для возникновения стоячей волны в трубе с одним закрытым концом. Они показывают также, что размеры трубы (l, d) пропорциональны длине звуковой волны, и при этом должны выполняться определенные условия для возникновения стоячей волны в трубе.

Установка работает следующим образом: продольная плоская звуковая волна 12 от источника звука 1 распространяется вниз перпендикулярно дну стаканчика 4 с частотой 1.2 кГц. Достигнув дна стаканчика, волна отражается и складывается с бегущей волной, образуя стоячую волну в пене с четко выраженными максимальными и минимальными значениями амплитуды звукового давления вдоль стаканчика. Распределение амплитуд звуковых давлений, преобразованных в электрические сигналы гидрофоном 3 вдоль стаканчика, фиксируется осциллоскопом 7 и записывается на компьютере 10. Перемещение гидрофона фиксируется на линейке 11 с помощью фиксатора 13. На рис. 2 представлено распределение электрических сигналов гидрофона вдоль стаканчика с пеной, представляющее собой максимумы и минимумы звуковых давлений. Из графика следует, что полуволна звуковой волны в пене $\lambda/2 = 2$ см.

Коэффициент затухания [10] определяли по формуле

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln(A_1/A_2), \tag{5}$$



Рис. 2. Распределение максимумов и минимумов звукового давления в пене вдоль стаканчика.

где A_1 — амплитуда звуковой волны в точке x_1 , A_2 — амплитуда звуковой волны в точке x_2 . Из графика также следует, что коэффициент затухания звука в пене $\alpha = 0.116 \text{ см}^{-1}$ или 37 дБ/м (среднее значение $\alpha = 34 \pm 4 \text{ дБ/м}$).

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента затухания звука в пене от кратности по нашим измерениям и по данным других авторов [1, 3–6]. График подтверждает общую тенденцию — уменьшение коэффициента затухания с ростом кратности. Однако по данным Канна [1], как мы уже упоминали, наблюдается рост коэффициента затухания с ростом кратности при кратностях $K = 40 \dots 60$. Интересно отметить, что, как следует из графика, измерения Dekrasinski [8] хорошо согласуются с нашими измерениями для пены Shave: у Dekrasinski $\alpha = 28.8 \text{ дБ/м}$ ($K = 13$), по нашим измерениям $\alpha = 30 \text{ дБ/м}$ при кратности $K = 11$.

Рассмотрим влияние частиц на затухание звука во влажной пене (5% водный раствор сурфактанта, кратность $K = 5$).

На рис. 4 представлена установка для измерения коэффициентов затухания наиболее чувствительным — импульсным методом. Установка включает источник звука 1, трубку 2, гидрофон 3, пьезодатчик 5, усилитель 6 сигнала от пьезодатчика, осциллоскоп 7, генератор импульсов 8, усилитель 9 сигнала от гидрофона, компьютер 10. Установка работает следующим образом: стаканчик с пеной 4 высотой h располагается в нижней части трубки 2 и получает звуковой импульс от источника звука 1, инициируемый генератором импульсов 8. Звуковой импульс, проходя сквозь пену, падает на пьезосенсор 5, электрический сигнал которого усиливается посредством усилителя 9, поступает на осциллоскоп 7 и фиксируется компьютером 10. Гидрофон 3 фиксирует начальную амплитуду звукового сигнала.

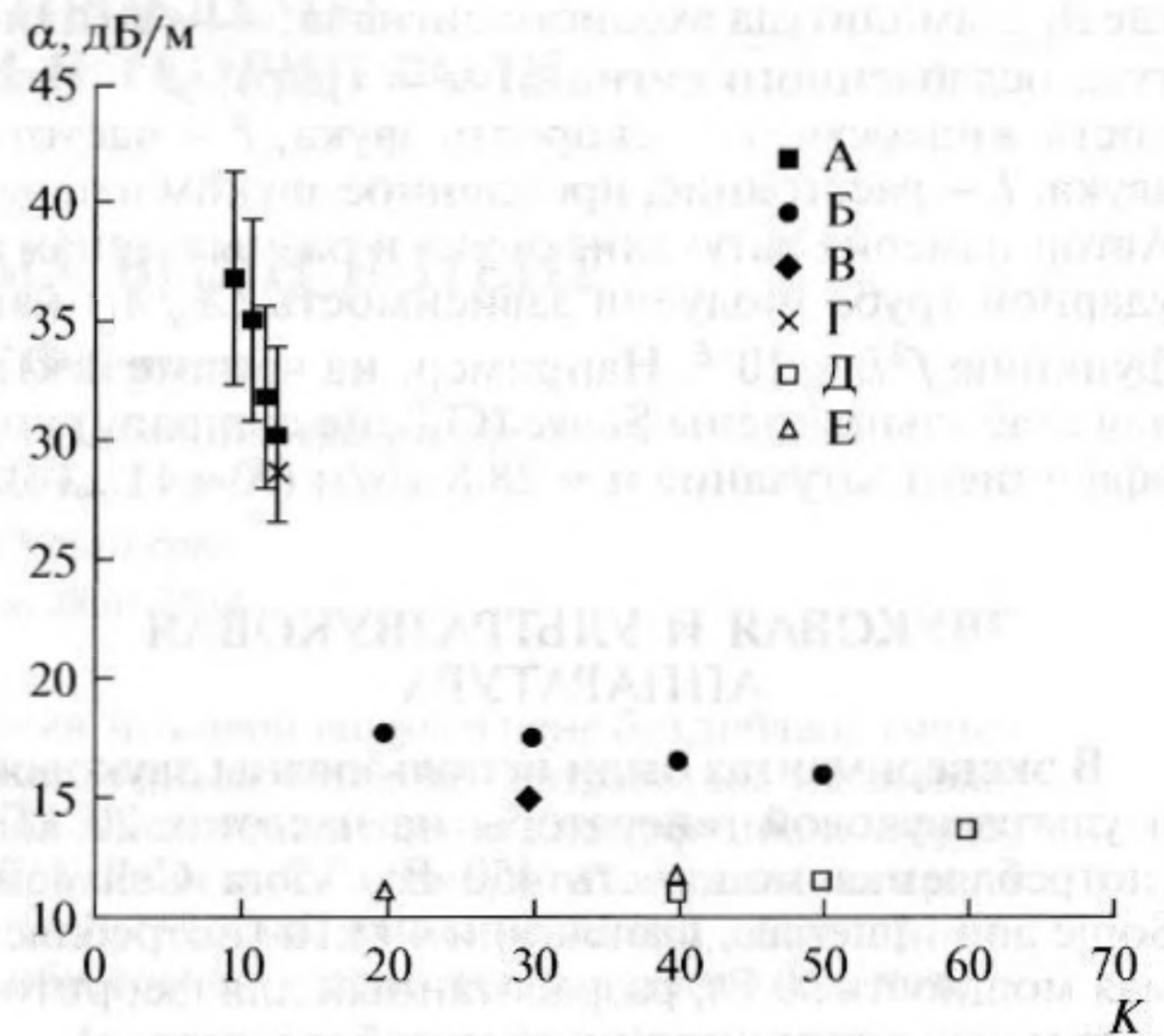


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания звука в пене α от кратности K . А — наши данные; Б, В, Г, Д, Е — данные работ [3], [4], [6], [1], [5] соответственно.

ла. Длительность импульса составляла $0.9\text{--}1.0 \text{ мс}$, что соответствовало частоте $1.0\text{--}1.1 \text{ кГц}$.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента затухания в пене, содержащей различную весовую концентрацию частиц золы с преобладающим размером 100 мкм . Из графика следует, что увеличение концентрации частиц в пене приводит к росту коэффициента затухания. Как мы уже рассматривали выше, Мохоп [2] получил аналогич-

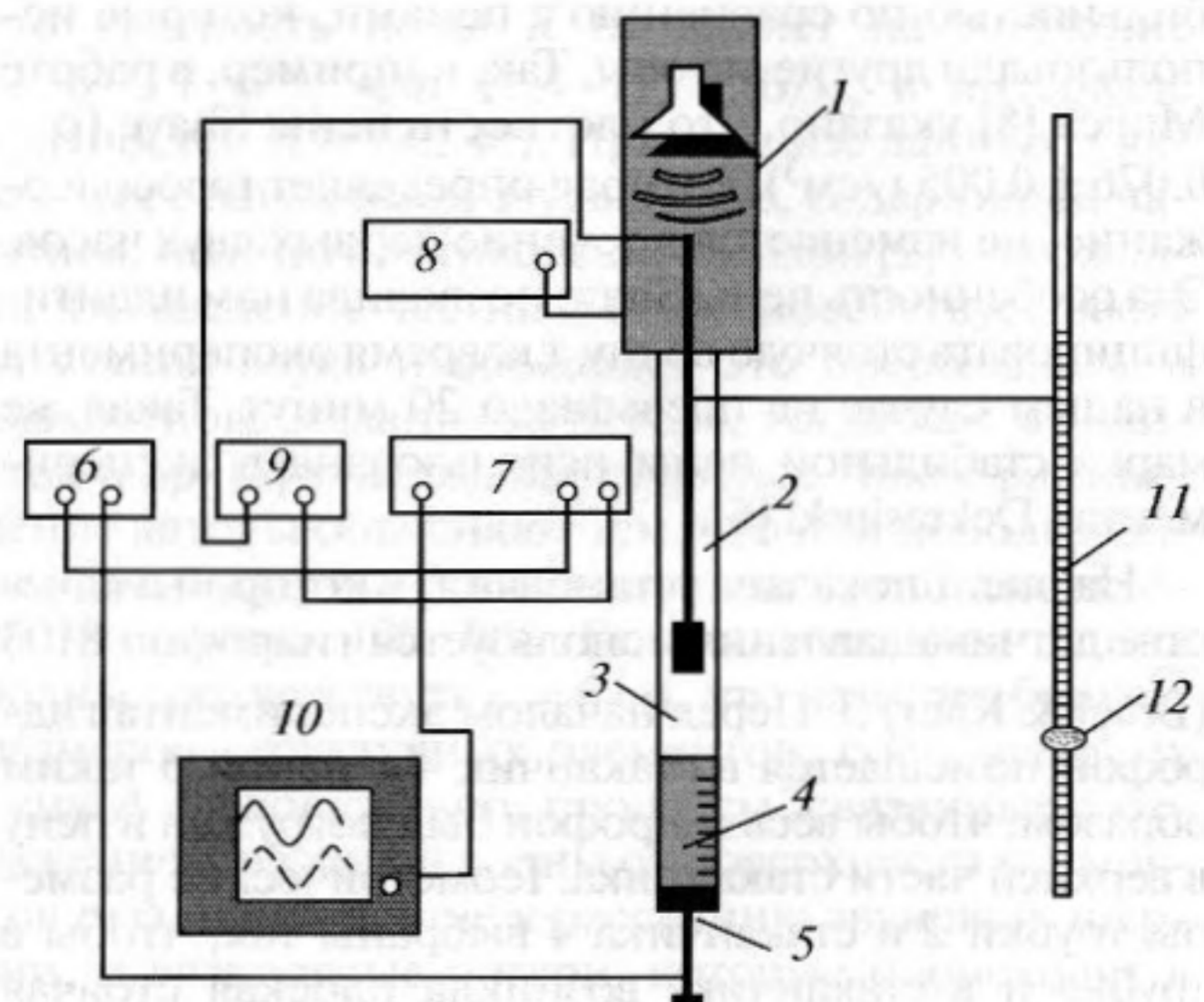


Рис. 4. Установка для измерения коэффициента затухания звука в пене импульсным методом: 1 — источник звука; 2 — трубка; 3 — гидрофон; 4 — пена; 5 — пьезосенсор; 6 — усилитель; 7 — осциллограф; 8 — генератор импульсов; 9 — усилитель; 10 — компьютер; 11 — линейка; 12 — фиксатор.

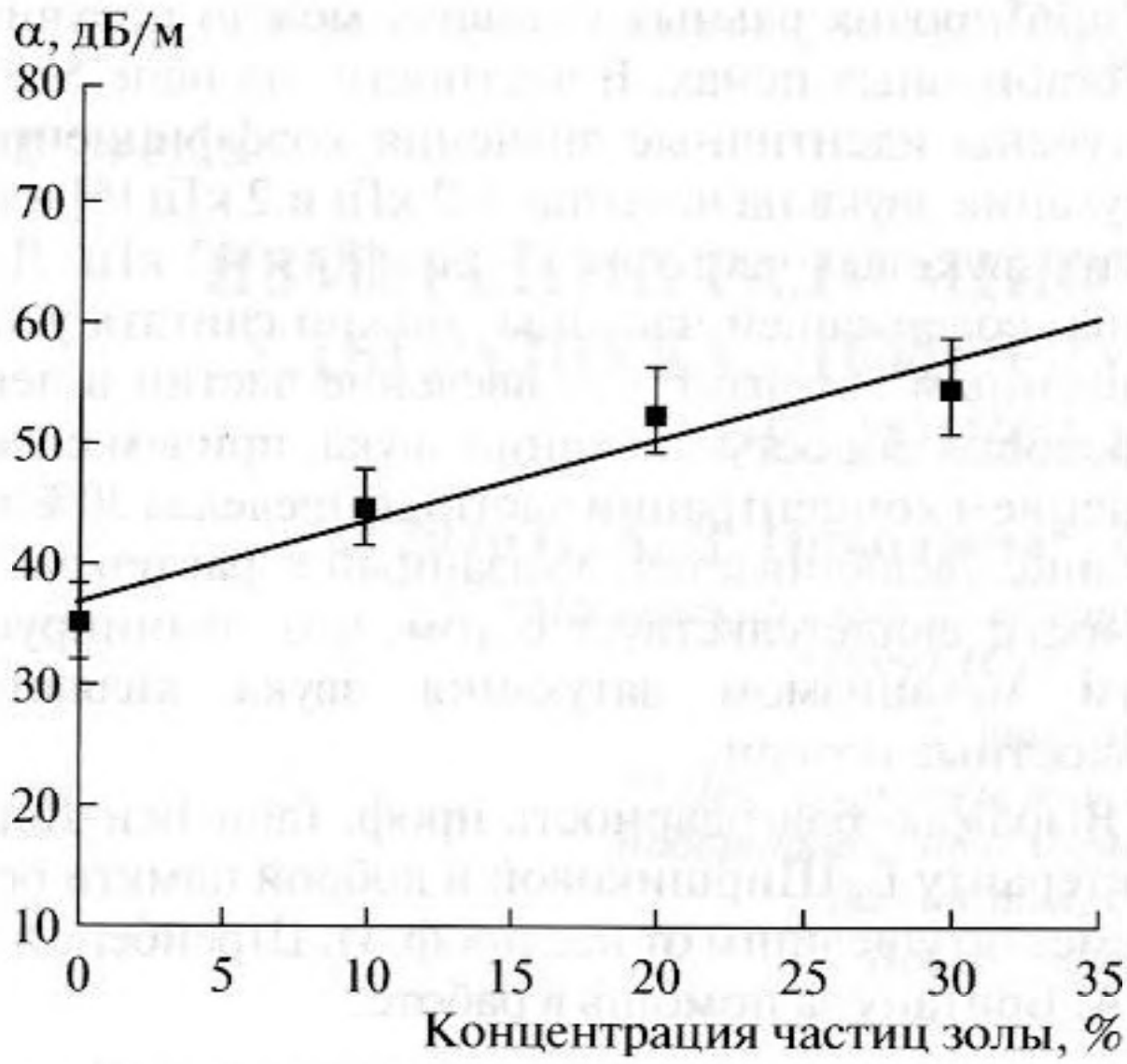


Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания α от содержания частиц во влажной пене.

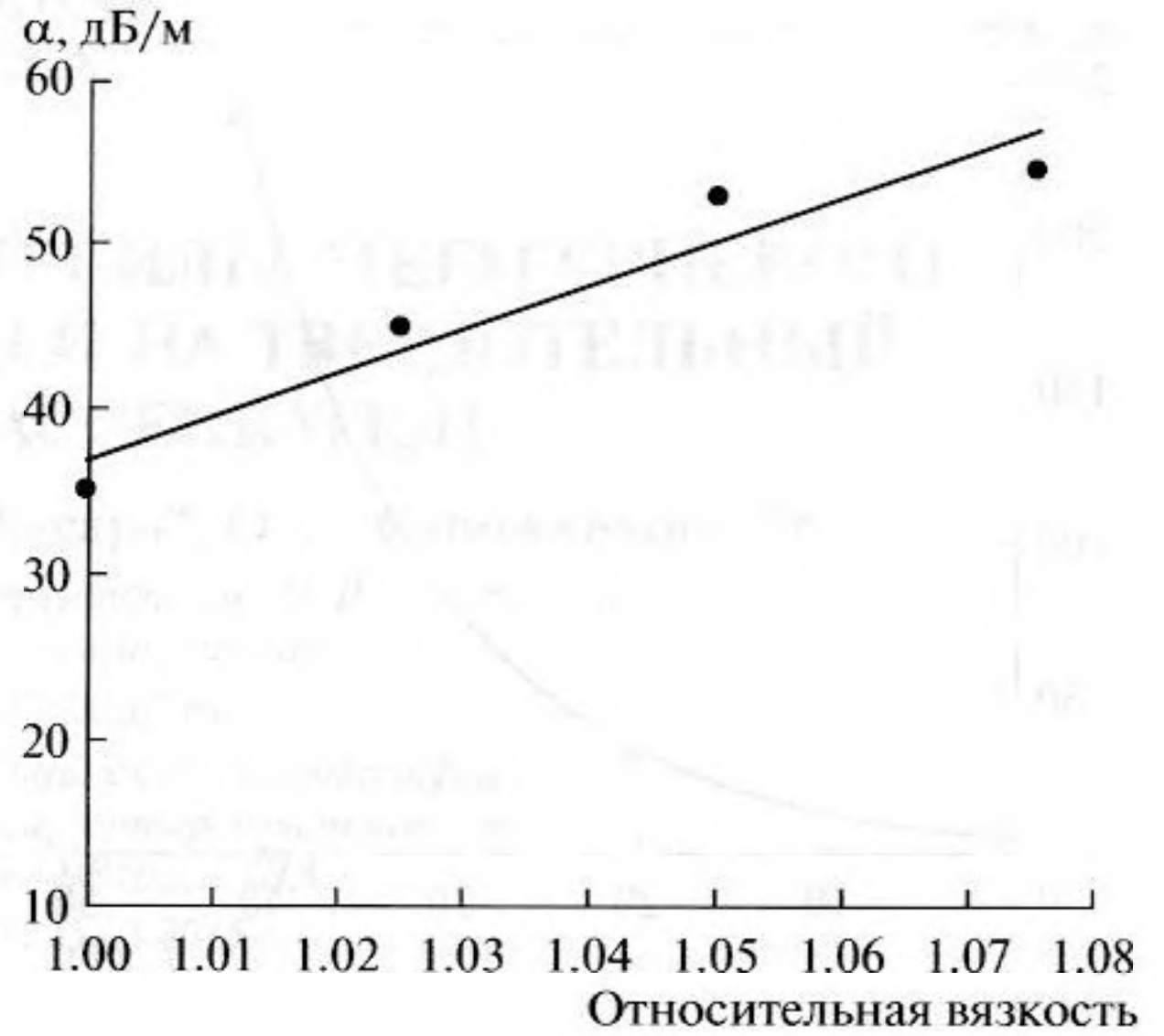


Рис. 6. Зависимость коэффициента затухания звука в пене α от относительной вязкости жидкости.

ную зависимость и объяснил ее, по крайней мере, двумя механизмами рассеяния звуковой энергии в пене на основе вязкостных потерь — с одной стороны, движением жидкости между пузырьками при распространении звуковой волны в пене, а с другой — потерями на трение при колебании пузырьков под действием звуковой волны. В нашем случае потери звуковой энергии усиливаются при введении в пену частиц золы, которые увеличивают вязкость жидкости в пене, в том числе в каналах Плато—Гиббса в соответствии с формулой Эйнштейна

$$\eta = (1 + A_0\phi)\eta_0, \quad (6)$$

где A_0 — коэффициент Эйнштейна, ϕ — объемное содержание частиц в пене, η_0 — вязкость жидкости, не содержащей частицы (воды).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента затухания звука от относительной вязкости пены, содержащей частицы. Интересно отметить, что увеличение на 7.5% относительной вязкости жидкости, содержащей частицы, вызывает усиление затухания звука в пене на 57%. Это свидетельствует в пользу механизма затухания, обусловленного вязкостными потерями. Это подтверждается также данными Dekrasinski [6], который показал, что при увеличении вязкости пенной жидкости с 1 до 240 П путем добавления глицерина затухание звука возрастает почти в 1.5 раза. А это означает, что вязкостный механизм поглощения звука в пене в рассмотренных случаях является преобладающим. Нетрудно видеть, что затухание растет пропорционально росту вязкости. Dekrasinski [6] приводит соотношение (8), связывающее коэффициент затухания α с вязкостью для высоких кратностей пены K :

$$\alpha = \eta d f^2 / \sigma c, \quad (7)$$

где η — динамическая вязкость жидкости, d — средний диаметр пузыря, f — частота звука, σ — поверхностное натяжение жидкости, c — скорость звука в пене.

В нашем случае для влажной пены с низкой кратностью $K = 5$ мы не имеем возможности использовать формулу (7) для количественной оценки зависимости коэффициента затухания от вязкости, т.к. зависимость (7) справедлива для высоких кратностей — сухих пен. Но что касается качественного сравнения указанных зависимостей, то налицо подтверждение, что в обоих случаях коэффициент затухания прямо пропорционален вязкости жидкости при данной частоте звука.

Представляло интерес измерить затухание звука в пене Shave в ультразвуковом диапазоне частот и сравнить величины коэффициентов затухания с результатами аналогичных измерений другими авторами, например [6]. С этой целью было использовано ультразвуковое устройство [9–14], с помощью которого были проведены измерения затухания звука в пене Shave на частоте $f = 20$ кГц и 42 кГц. Ультразвуковые колебания передавались через дно стеклянной трубки, наполненной пеной, перпендикулярно дну. Гидрофон погружали в пену сверху вниз, фиксировали величину электрического сигнала в верхней и нижней позиции и по формуле (5) определяли затухание ультразвука. На рис. 7 представлена частотная зависимость коэффициента затухания звука в пене. Из графика следует, что затухание звука в пене нелинейно возрастает с ростом частоты, и эта зависимость адекватно описывается как экспоненциальной, так и квадратичной функциями. Квадратичная частотная зависимость коэффициента затухания звука характерна для среды, обладающей сдвиговой и объемной

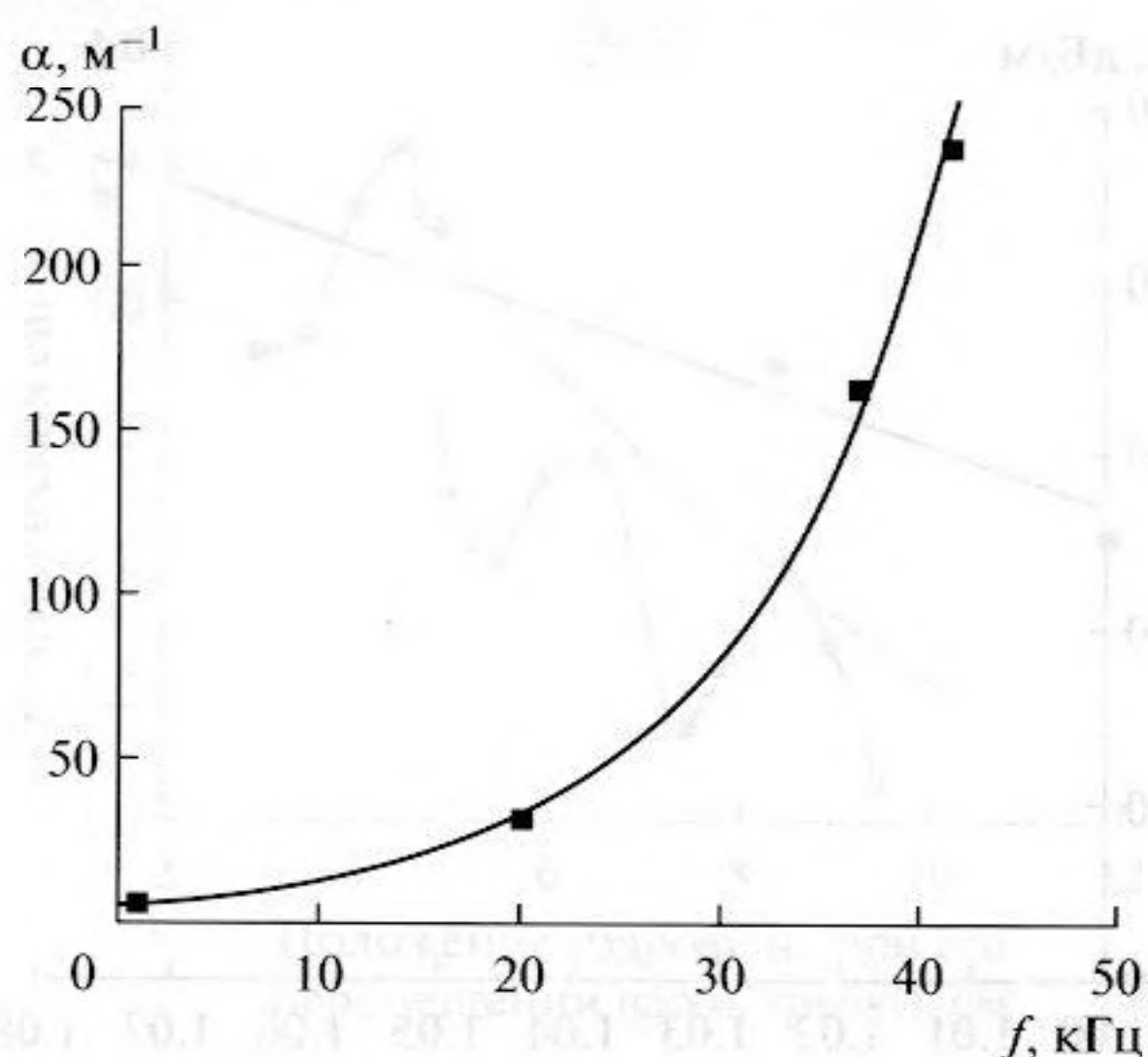


Рис. 7. Затухание ультразвука в пене Shave в зависимости от частоты f .

вязкостью и теплопроводностью [15], при этом коэффициент затухания равен

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho c^3} \left[\frac{4\eta}{3} + \zeta + k \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \right], \quad (8)$$

где ω — циклическая частота ($2\pi f$), ρ — плотность среды, c — скорость звука в среде, η и ζ — коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости, k — коэффициент теплопроводности, C_v и C_p — теплоемкость среды при постоянном объеме и давлении соответственно. Выражение (8) для коэффициента затухания применимо для звуковых волн малой амплитуды, что соответствует нашему случаю. Для характеристики затухания звука часто пользуются величиной α/f^2 , которая не зависит от частоты и является параметром, характеризующим свойства среды. Воспользуемся этой характеристикой для сравнения величин затухания звука в пене Shave, измеренного на частоте $f_1 = 42$ кГц, $\alpha_1 = 236$ м⁻¹ (наши измерения) и на частоте $f_2 = 37$ кГц, $\alpha_2 = 160$ м⁻¹ (измерения импульсным методом [8]).

Запишем и сравним приведенные значения коэффициентов затухания:

$$\alpha_1^* = (\alpha_1/f_1^2) = 0.133 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1} \text{ с}^2;$$

$$\alpha_2^* = (\alpha_2/f_2^2) = 0.117 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1} \text{ с}^2.$$

Нетрудно видеть, что значения совпадают в пределах ошибки эксперимента (12%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сказать, что воспроизводимые результаты измерений затухания звука в пе-

не при прочих равных условиях можно получить на стабильных пенах. В частности, на пене Shave получены идентичные значения коэффициентов затухания звука на частотах 1.2 кГц и 2 кГц [6] и на ультразвуковых частотах 37 кГц [8] и 42 кГц. Для пены, содержащей частицы, можно считать установленным тот факт, что введение частиц в пену способствует росту затухания звука, причем с увеличением концентрации частиц в пределах 30% затухание увеличивается. Указанный характер зависимости свидетельствует о том, что доминирующим механизмом затухания звука являются вязкостные потери.

Выражаю благодарность проф. Габи Бен-Дору, мастеранту Е. Ширшиковой и доброй памяти безвременно ушедшим от нас проф. И. Шрейберу и д-ру А. Британу за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канн К.Б., Феклистов В.Н., Шушков Г.А. Влияние структурных параметров на поглощение звука в пенах // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 147–149.
2. Moxon N.T., Torrance A.C., Richardson S.B. The attenuation of acoustic signals by aqueous and particulate foams // Applied Acoustics. 1988. V. 24. № 3. P. 193–209.
3. Феклистов В.Н., Шушков Г.А. Исследование акустических характеристик газожидкостных пен с твердыми частицами // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 326–328.
4. Raspert R., Griffiths S.K. The reduction of blast noise with aqueous foam // J. Acoust. Soc. Am. 1983. V. 74. P. 1757–1763.
5. Оренбах З.М., Шушков Г.А. Акустические характеристики водно-воздушных пен // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 1. С. 127–132.
6. Dekrasinski J. Some aspects of the fluid dynamics of liquid-air foams of high dryness fraction // Prog. Aerospace Sci. 1992. V. 29. № 2. P. 125–163.
7. Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials by impedance tube method. ASTM C-384-90a (1990).
8. Mujica N., Fauve S. Sound velocity and absorption in a coarsening foam // Phys. Rev. 2002. E 66. P. 021404.
9. Devin C., Jr. Survey of thermal, radiation, and viscous damping of pulsating air bubbles in water // J. Acoust. Soc. Am. 1959. V. 31. P. 1654–1667.
10. Bergman L. *Ultraschall*. Zurich, 1954. P. 25–26.
11. Фаерман В.Т. Соединение текстильных материалов ультразвуком. М.: Легкая Индустрия, 1977.
12. Фаерман В.Т. Авторское свидетельство № 1685711 (1991). Устройство для ультразвуковой сварки полимеров.
13. Фаерман В.Т. Ультразвуковые приборы. Препринт Тверского гос. университета, 1986.
14. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
15. Поляков А. Поглощение ультразвука / Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Под ред. Голяминой И.П. и др. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 400 с.