АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIX 1983 Вып. 5

УДК 534.8:69.034.92

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Воронина Н. Н.

Приведены результаты экспериментального исследования влияния макроструктуры на акустические свойства волокнистых звукопоглощающих материалов. Получены эмпирические выражения для волновых параметров материала в зависимости от плотности и диаметра волокна.

При проектировании акустических конструкций, применяемых для снижения уровня шума в производственных помещениях, возникает необходимость предварительного расчета коэффициента звукопоглощения облицовки. Коэффициент звукопоглощения может быть вычислен по акустическим (волновым) параметрам [1] пористого или волокнистого материала, используемого в качестве поглотителя. К основным акустическим параметрам относятся безразмерное волновое сопротивление W, выраженное в долях волнового сопротивления воздуха, и постоянная распространения γ неп/см.

Оба параметра могут быть записаны в комплексном виде: $W=W_a-jW_i$ и $\gamma=\alpha+j\beta$, где W_a, W_i — действительная и мнимая компоненты волнового сопротивления; α неп/см — показатель затухания амплитуды звукового давления в материале; β неп/см — фазовая постоянная.

Обычно в расчетах используются значения акустических параметров, полученные экспериментально согласно методике, изложенной в работах [2, 3].

Современная теория поглощения звука в среде с внутренним трением [1, 4, 5] не позволяет правильно оценить численные значения волнового сопротивления и постоянной распространения. Поэтому в расчетах коэффициента звукопоглощения, допускающих известную погрешность, вполне оправдано применение некоторых приближенных соотношений для акустических параметров, установленных эмпирическим путем, т. е. подбором простых аналитических выражений для W и γ на основе анализа достаточно большого количества опытных данных.

Впервые эмпирический метод исследования был осуществлен в работе [6], в которой было установлено, что волновое сопротивление и постоянная распространения волокнистых звукопоглощающих материалов с жестким скелетом могут быть вычислены по величине статического сопротивления продуванию σ (г/см^3·с) согласно следующим равенствам:

$$W=1+9{,}08(f/\sigma)^{-0{,}75}-11{,}9(f/\sigma)^{-0{,}73}, \quad (1)$$

$$\gamma=10(f/\sigma)^{-0{,}59}+jk[1+10{,}8(f/\sigma)^{-0{,}7}], \quad (2)$$

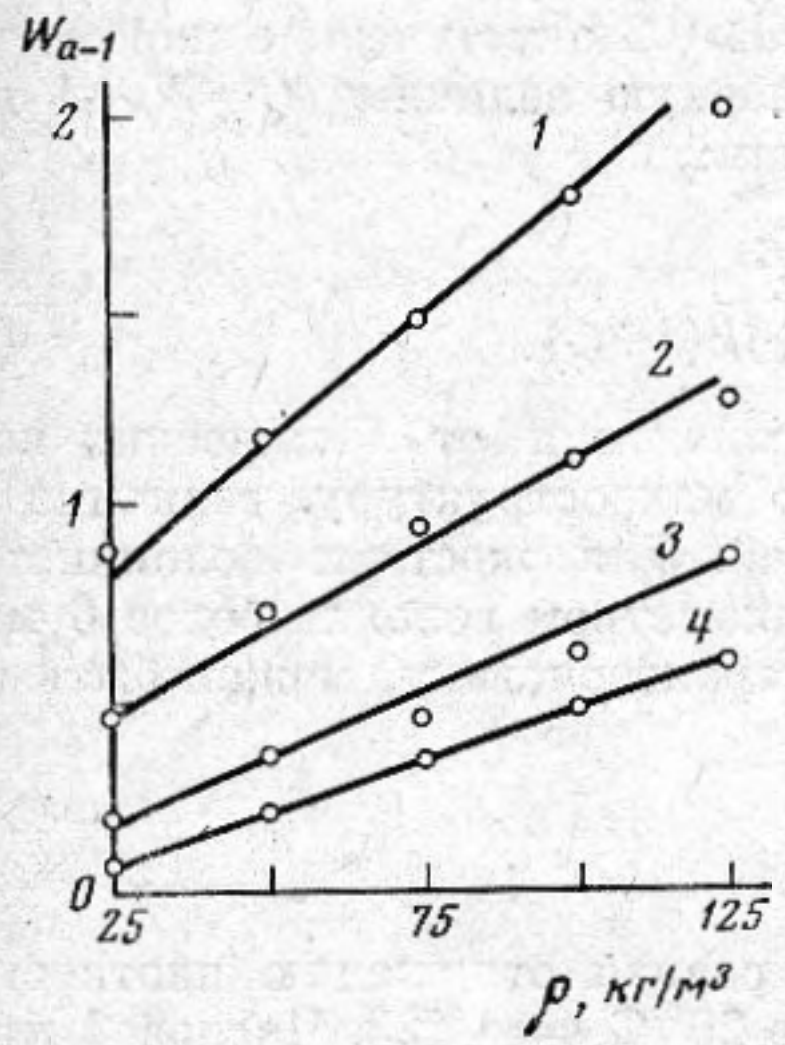
где $k=2\pi f/c$, см$^{-1}$ — волновое число для воздуха; f, Гц — частота; c, см/с — скорость звука.

Таким образом, для вычисления акустических параметров, согласно выражениям (1) и (2), требуется измерить известным способом [7, 8] только одну величину — сопротивление продуванию, что является несомненным достоинством работы [6]. Однако выбор величины σ в качестве определяющего параметра не является, строго говоря, единственным. Известно, что сопротивление продуванию существенно зависит от плотности материала ρ (кг/м^3) и диаметра волокна d (мкм) [6, 8]. В работе [8] приведена номограмма, полученная экспериментально, для определения величины σ по заданным значениям ρ и d. Следовательно, при расчете аку-

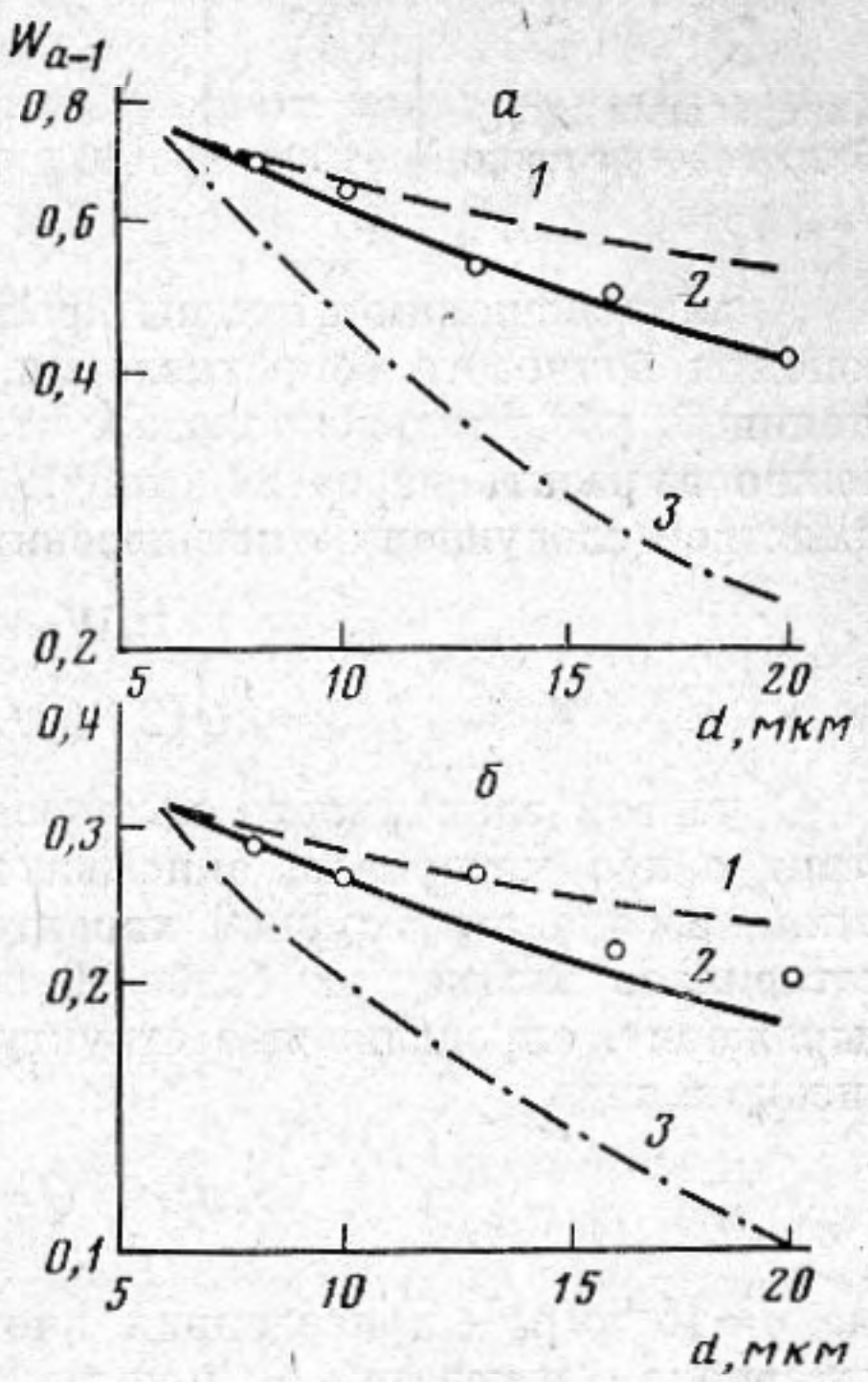
стических параметров, согласно равенствам (1)—(2), сопротивление продуванию становится всего лишь промежуточной величиной.

Настоящая статья посвящена исследованию количественной зависимости акустических параметров от частоты звука и физических констант, характеризующих макроструктуру волокнистого звукопоглощающего материала. К последним относятся перечисленные выше плотность материала и диаметр волокна, а также в отдельных случаях и длина волокна h (см).

Для исследования были выбраны некоторые волокнистые мате-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость действительной компоненты волнового сопротивления минеральной ваты с диаметром волокна 8 мкм от плотности, определенная экспериментально для частоты: 250 Гц – *1*; 500 – *2*; 1000 – *3*; 2000 Гц – *4*

Фиг. 2. Зависимость действительной компоненты волнового сопротивления различных волокнистых материалов от диаметра волокна, определенная экспериментально для частоты 500 Гц – *а* и 2000 Гц – *б*. ($\tilde{A}/\sqrt[3]{d}$ – 1; $\tilde{B}/\sqrt{d}$ – *2*; $\tilde{C}/d$ – *3*)

риалы отечественного производства с различными значениями плотности, диаметра и длины волокна, представленными в таблице. Акустические параметры материалов определялись в соответствии с методикой [3].

Изменение в достаточно широких пределах значений плотности от 10 до 125 кг/м³ и диаметра волокна от 2 до 20 мкм позволило пронаблюдать характер зависимости акустических параметров с увеличением одной из двух констант среды (ρ или d) при постоянном значении другой [9].

Для примера на фиг. 1 приведены экспериментальные данные, полученные для действительной компоненты волнового сопротивления при различной степени уплотнения минеральной ваты.

На фиг. 2 представлены опытные значения величины W_a—1 различных волокнистых материалов с плотностью 50 кг/м³, диаметр волокон которых изменялся от 8 до 20 мкм. Там же показаны функции $\tilde{A}/\sqrt[3]{d}$; $\tilde{B}/\sqrt{d}$; $\tilde{C}/d$ (кривые *1*, *2*, *3* соответственно), где $\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{C}$ — постоянные, удовлетворяющие условию $\tilde{A}/\sqrt[3]{6} = \tilde{B}/\sqrt{6} = \tilde{C}/6$.

Из анализа графиков, приведенных на фиг. 1, 2, следует, что действительная компонента волнового сопротивления изменяется прямо пропорционально плотности материала и обратно пропорционально корню квадратному из значения диаметра волокна: $W_a \sim \rho/\sqrt{d}$.

Волокнистый материал	Диаметр волокна, мкм	Длина волокна, см	Плотность материала, кг/м³				
Стекловолокно	2	8	10	15	20	25	30
»	6	4	13	25	40	50	–
»	13	3	25	50	75	125	–
Минеральная вата	8	4	25	50	75	100	125
Капроновое волокно	20	10	25	50	90	–	–

Анализ экспериментальных результатов, полученных для мнимой компоненты волнового сопротивления, показателя затухания и фазовой постоянной, убедительно показал, что при $kd \geqslant 0{,}2$ акустические параметры можно выразить через некоторую безразмерную величину $Q = W_a - 1$ посредством следующих эмпирических равенств:

$$W = 1 + Q - jQ; \tag{3}$$

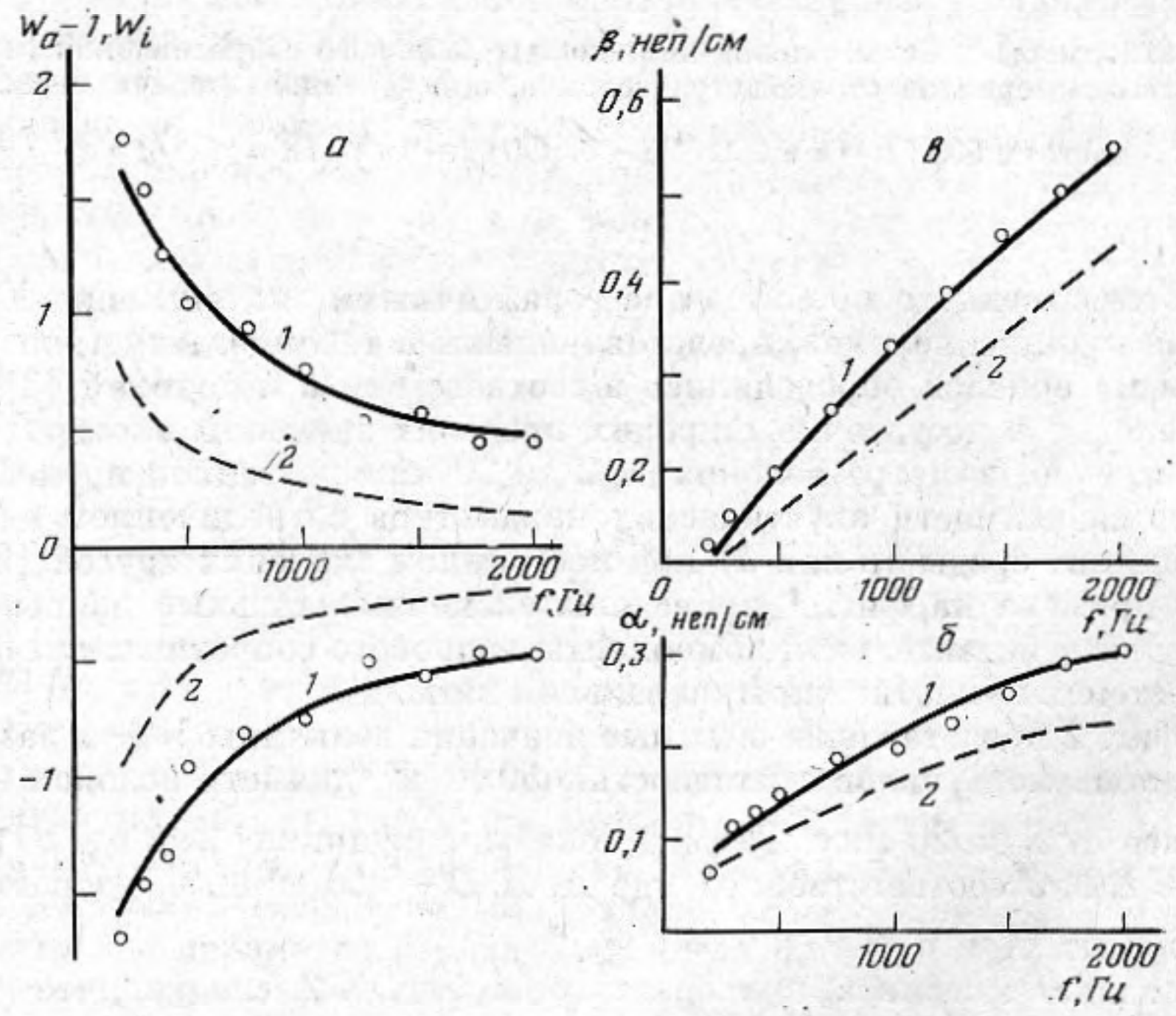
$$\gamma = kQ(2+Q)/(1+Q) + jk(1+Q). \tag{4}$$

С учетом зависимости волнового сопротивления от физических констант ρ и d материала, описывающих его макроструктуру, величина Q была названа структурной характеристикой. Для жестких волокнистых материалов плотностью более 80 кг/м³ и диаметром волокна более 6 мкм выражение, определяющее структурную характеристику, может быть записано в виде

$$Q = q/\sqrt{kd}, \tag{5}$$

где $q = 10^{-2}\rho/\rho_0$ – приведенная плотность, равная отношению плотностей материала ρ и воздуха ρ_0; при температуре 20° С $q = \rho/123$. Числовой множитель выбран таким образом, чтобы величины k и d имели размерность см⁻¹ и мкм соответственно.

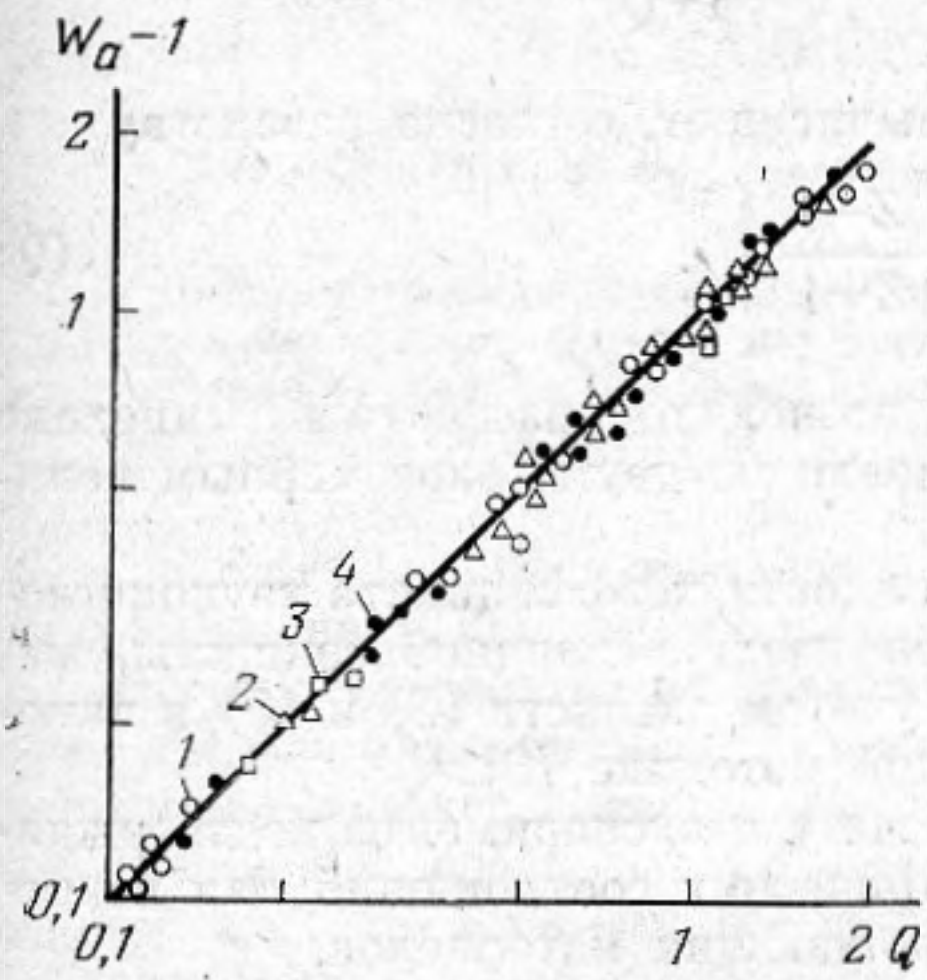
Для сравнения на фиг. 3, *а*, *б*, *в* представлены частотные зависимости



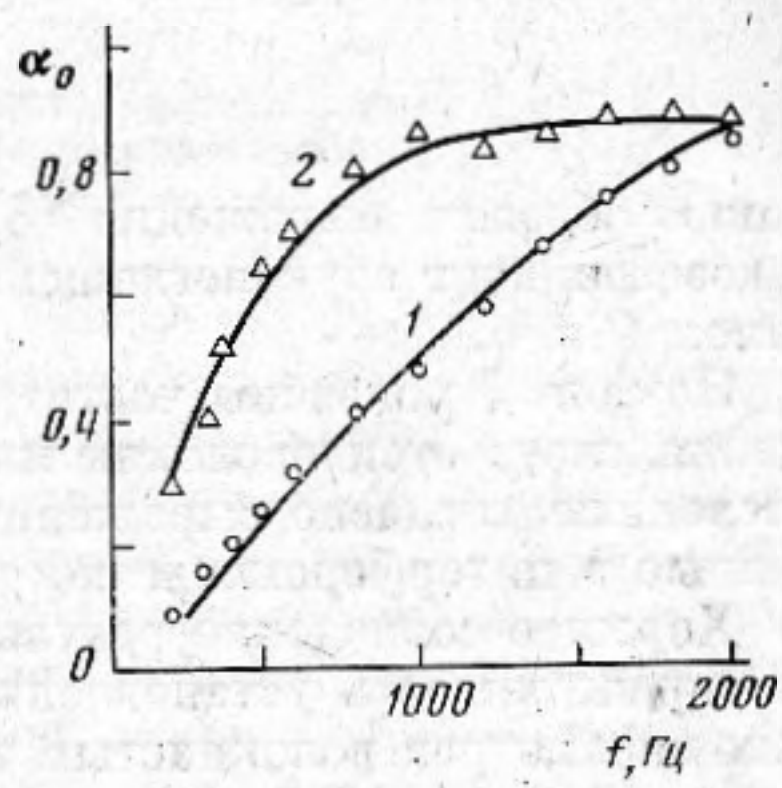
Фиг. 3. Частотные зависимости волнового сопротивления – *а*, показателя затухания – *б* и фазовой постоянной – *в* минеральной ваты плотностью 1000 кг/м³, рассчитанные, согласно выражениям (3) – (4), – *1*; выражениям (1) – (2) – *2*

волнового сопротивления и постоянной распространения минеральной ваты плотностью 100 кг/м^3 и диаметром волокна 8 мкм, вычисленные по эмпирическим формулам (3)—(4) и по формулам (1)—(2) при σ=8,7 г/см^3·с, определенном экспериментально. Точками на тех же графиках показаны опытные значения акустических параметров минеральной ваты.

Следует отметить, что расчет, согласно равенствам (1)—(2), приводит к заниженным результатам, что, по-видимому, объясняется не только большими погрешностями, возникающими при измерении сопротивления продуванию, но и неточным выбором показателей степени у переменной f/σ. В отличие от этого справедливость выражений (3)—(5) удовлетворительно подтверждается экспериментально.



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Зависимость волнового сопротивления волокнистых материалов от структурной характеристики, вычисленная согласно равенству (3) и определенная экспериментально для стекловолокна при d=2 мкм — *1*; d=6 — *2*; d=13 — *3* и минеральной ваты d=8 мкм — *4*

Фиг. 5. Частотная зависимость коэффициента звукопоглощения стекловолокна марки «Префизол» (ρ=100 кг/м^3, d=4 мкм), рассчитанная, согласно выражению (9), с учетом (8) и (5) и измеренная экспериментально при толщине слоя 2 см — *1*; 4 см — *2*

Распространение звуковой волны в достаточно рыхлой волокнистой среде с гибким скелетом, как правило, сопровождается движением самих волокон, приводящим к возникновению дополнительных потерь энергии колебательного процесса. Это выражается в увеличении по абсолютному значению акустических параметров материала. Для учета влияния гибкости скелета на акустические свойства волокнистого материала в выражение (5) для структурной характеристики была введена некоторая поправка q_0, зависящая от приведенной плотности q и безразмерных параметров kd и d/h следующим образом:

$$q_0=(10q^2+0{,}5q^{-1}+0{,}5k^2d^4h^{-2})^{-1}. \qquad (6)$$

Выражение для структурной характеристики волокнистого материала с жестким скелетом теперь запишется в виде

$$Q=(q+q_0)/\sqrt{kd}. \qquad (7)$$

Эмпирические выражения (6) и (7) были установлены на основе анализа экспериментальных данных, полученных для стекловолокна плотностью 13—50 кг/м^3 с диаметром волокна 6 мкм, и были подтверждены для других исследуемых волокнистых материалов, перечисленных в таблице.

На фиг. 4 в качестве примера представлена функция $W_a(Q)$, рассчитанная согласно равенству (3) с учетом соотношения (7) и определенная экспериментально для различных волокнистых материалов. Относительные расхождения между результатами расчета и эксперимента не превышают ±10%, что соответствует допустимой погрешности акустических измерений.

Используя равенства (3)—(4), можно представить известное выражение для импеданса Z слоя волокнистого материала толщиной l, расположенного на жестком основании, [1] при нормальном падении звука в следующей форме:

$$Z=W \operatorname{cth} \gamma l=(1+Q-jQ) \operatorname{cth} kl \left(Q \frac{2+Q}{1+Q}+j(1+Q)\right). \tag{8}$$

Коэффициент звукопоглощения α_0 вычисляют, согласно равенству

$$\alpha_0=1-\left|\frac{Z-1}{Z+1}\right|^2. \tag{9}$$

Таким образом, выражения (8) и (9) позволяют рассчитать импеданс и коэффициент звукопоглощения облицовки по двум безразмерным величинам Q и kl.

На фиг. 5 показаны частотные зависимости коэффициента звукопоглощения слоев стекловолокна марки «Префизол» различной толщины, вычисленные, согласно выражению (9), с учетом равенств (8) и (5) и измеренные в интерферометре по стандартной методике [3].

Хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента подтверждает справедливость установленных эмпирических соотношений для волновых параметров волокнистых звукопоглощающих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Цвиккер К., Костен К.* Звукопоглощающие материалы. М.: Изд-во иностр. лит., 1952.
2. *Баранова З. Н., Велижанина К. А.* Акустические параметры некоторых звукопоглощающих материалов.— Акуст. ж., 1957, т. 3, № 2, с. 99—103.
3. Руководство по измерению и расчету акустических характеристик звукопоглощающих материалов. М.: Стройиздат, 1979.
4. *Attenborough K., Sides D.* The Influence of microstructure on propagation in porous, fibrous Absorbents.— J. Sound and Vibration, 1971, v. 16, № 3, p. 419—442.
5. *Kawasima V.* Sound propagation in fibrous block as a composite medium.— Acustica, 1960, v. 10, p. 208—221.
6. *Delaney M., Bazley E.* Acoustical properties of fibrous absorbent Materials.— Applied Acoustics, 1970, v. 3, p. 105—114.
7. *Беранек Л.* Акустические измерения. М.: Изд-во иностр. лит., 1952.
8. *Bies D., Hansen C.* Flow resistance information for acoustical design.— Applied Acoustics, 1980, v. 13, № 5, p. 357—391.
9. *Воронина Н. Н.* Эмпирические выражения для расчета акустических параметров волокнистых звукопоглощающих материалов по их структурной характеристике.— Тр. НИИСФ. Вып. 15. Строительная акустика. М.; 1976.

Научно-исследовательский институт
строительной физики

Поступила в редакцию
18.V.1982