

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВИБРО- И ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛОТЕН

PREDICTION OF VIBRATION AND SOUND ABSORPTION OF TEXTILE FABRICS

А.П. БАШКОВ, Г.В. БАШКОВА, С.Б. БАЙЖАНОВА
A.P. BASHKOV, G.V. BASHKOVA, S.B. BAYZHANOVA

(Ивановская государственная текстильная академия,
Южно-Казахстанский государственный университет им. М.О. Ауезова)
(Ivanovo State Textile Academy,
South-Kazakhstan State University named after M.O. Auezov)
E-mail: ttp@igta.ru

В статье рассматривается расчетный способ определения акустических свойств звукопоглощающих панелей из текстильных материалов, в частности, из льносодержащей пряжи. Предлагаемая методика основана на волновых уравнениях Гельмгольца и применима при расчете плоских однородных звукопоглотителей, используемых в любых помещениях, в том числе в салонах транспортных средств. Полученные аналитические зависимости сопоставимы при сравнении с экспериментальными данными, что позволяет судить об их пригодности для прогнозирования акустических свойств проектируемых трикотажных полотен.

The calculation method of determining acoustical properties of flax knitted baffle blanket is considered in the article. The offered method is based on Helmholtz wave equations and is used for two-dimensional homogeneous sound absorber designing and particularly for transport facilities interior. Obtained analytical dependences are comparable with experimental data, which gives us opportunity to conclude on their availability for prediction of projected knitted fabrics acoustical properties.

Ключевые слова: трикотажные полотна, текстильные композиты, акустические свойства, волновое сопротивление, акустический импеданс, коэффициент звукопоглощения.

Keywords: knitted fabrics, textile composites, acoustical properties, wave resistance, acoustical impedance, sound absorption coefficient.

В последние годы текстильные композиты широко используются в качестве отделочных панелей, а иногда и конструктивных материалов транспортных средств, что заставляет оценивать не только их прочностные характеристики, но и способность противостоять механическим колебаниям на звуковых и более высоких частотах. В качестве текстильной основы таких композитов предлагается использовать основовязаное полотно из льняной пряжи. Трикотажные структуры из льноволокна

обеспечивают не только глубокое формирование композитных деталей, но и лучшие вибро- и звукопоглощающие свойства композита. Прогнозирование акустических свойств материала можно проводить различными методами: на основе классической теории волновых колебаний, методом конечных элементов с построением матриц жесткости, вязкости и акустического поля среды любой конфигурации и методом статистического анализа энергии.

В простейшем случае при рассмотрении звукопоглощающей панели можно использовать зависимости, полученные при решении волнового уравнения Гельмгольца [1]:

$$\nabla^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varphi = 0. \quad (1)$$

Для акустических колебаний плоской стенки уравнение примет вид:

$$\nabla^2 \varphi + (\omega/c)^2 p = 0, \quad (2)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа; $\omega = 2\pi f$ – волновая частота; f – частота звука; p – акустическое давление.

Потенциал скорости в данном случае можно представить в виде тригонометрической функции:

$$\varphi = a \cos(\mu y) \cdot e^{-\gamma x}, \quad (3)$$

где μ и γ – параметры, удовлетворяющие равенству

$$\mu^2 - \gamma^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \equiv k^2, \quad (4)$$

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, определяющее параметр распространения волны; λ – длина волны.

Функция (3) может быть разделена на действительную и мнимую части. Тогда член a можно записать как $a = i\omega$, а функция $e^{at} = e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$, где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Для плоской волны, распространяющейся в одном направлении, можно записать:

$$\varphi(x, t) = \varphi_0 \exp[i(\omega t - kx)]. \quad (5)$$

Тогда, с учетом (2), можно определить звуковое давление p и колебательную скорость v :

$$\begin{aligned} p &= p_0 \exp[i(\omega t - kx)], \\ v &= v_0 \exp[i(\omega t - kx)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Звукопоглощающие свойства материала можно оценивать его волновым сопротивлением (или волновым импедансом) W , которое равно отношению звукового давления к колебательной скорости v частиц, то есть

$$W = p/v = \rho c, \quad (7)$$

где ρ – плотность материала. При наличии плоской волны волновое сопротивление приближается к акустическому импедансу Z_a , который, в свою очередь, связан с механическим импедансом Z_m соотношением $Z_m = S^2 Z_a$.

Принимая граничное условие $y = \pm H$ (H – размер панели), из уравнения (2) получим дисперсионное уравнение:

$$\frac{\text{ctg}(\mu_H)}{\mu_H} = -i \frac{Z_m}{\rho \omega H}, \quad (8)$$

где $\mu_H \equiv \mu H$.

Применительно к звукопоглощающей панели можно считать, что величина импеданса Z_m не зависит от волновой структуры акустического поля. Тогда параметр распространения будет $\gamma = i(\omega/c)$, где c – комплексная скорость звука в материале.

При этом звуковое давление, согласно (2), будет определяться выражением

$$p = -\gamma W \varphi. \quad (9)$$

Величина зависимостей γ и W определяется структурой и физическими свойствами пористого звукопоглощающего материала. Для волокнистых материалов основным характерным параметром материала служит удельное аэродинамическое сопротивление r , определяемое как перепад давлений, требуемый для продувания слоя материала единичной толщины с единичной среднерасходной скоростью. В этом случае акустические характеристики γ и W можно представить как функцию приведенных характеристик γ'/k и $W/\rho c$ от безразмерной частоты pf/r .

В простых случаях без большой погрешности можно использовать эмпирические зависимости [2]

$$\frac{\gamma}{k} = 0,189 \left(\frac{\rho f}{r} \right)^{-0,595} + i \left[1 + 0,0978 \left(\frac{\rho f}{r} \right)^{-0,700} \right], \quad (10)$$

$$\frac{W}{\rho c} = \left[1 + 0,0571 \left(\frac{\rho f}{r} \right)^{-0,754} \right] - i \cdot 0,087 \left(\frac{\rho f}{r} \right)^{-0,732}. \quad (11)$$

Эта модель приближенно соответствует сотовым звукопоглощающим панелям, причем звуковая волна распространяется перпендикулярно сечению сот. При этом характерный размер нормально ориентированной сотовой ячейки звукопоглощающей панели должен быть достаточно мал по сравнению с длиной волны. Этим требованиям отвечают композиты в виде ламинированных текстильных полотен. Трикотажное полотно в данном случае наиболее предпочтительно, поскольку ячейки-

соты трикотажной структуры более рельефны, чем на ткани. Ориентация фрагментов ячейки (нитей в петлях) многоосная, что гасит стоячие волны в ячейке и препятствует резонансным явлениям. Кроме этого, льняное волокно, входящее в состав текстильного каркаса, само по себе обладает более высоким коэффициентом звукопоглощения, чем полимерные или стеклянные волокна.

Величина импеданса в выражении (8) рассчитывается при условии, что звуковые волны в слое звукопоглощающего материала испытывают полное отражение на глубине в половину толщины панели. Акустический импеданс в этом случае можно определить по формуле

$$Z_a = W \operatorname{cth}(\gamma B), \quad (12)$$

где B – полутолщина панели, $\operatorname{cth}(\gamma B)$ – мнимая часть импеданса.

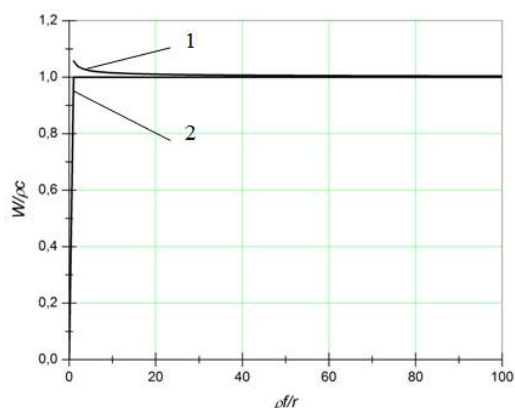


Рис. 1

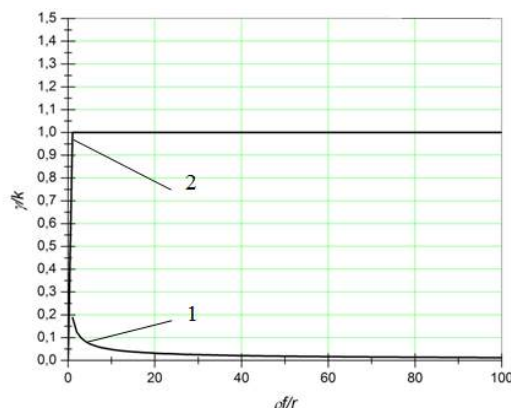


Рис. 2

Расчеты по формулам (10) (рис. 1 – взаимозависимость приведенных характеристик $W/\rho c$ и $\rho f/r$: 1 – действительная часть; 2 – с учетом комплексной составляющей) и (11) (рис. 2 – взаимозависимость приведенных характеристик γ/k и $\rho f/r$: 1 – действительная часть; 2 – с учетом комплексной составляющей) показали, что, начиная со значений $\rho f/r > 0,02$, величины $\frac{W}{\rho c} = 1$ и $\frac{\gamma}{k} = 1$ практически не зави-

сят ни от частоты звука, ни от плотности материала. Величина параметра r меняется для различных волокнистых материалов в широких пределах – от 2×10^3 до 2×10^5 Па·с/м [2], но, даже если брать максимальное значение r , то только в октавной полосе со среднегеометрической частотой 63 Гц оно будет оказывать какое-нибудь значимое влияние на W и k . Тогда, с учетом (4) и (7), выражение (12) можно записать в следующем виде:

$$Z_a = \rho c \operatorname{cth}(kB) = \rho c \operatorname{cth}\left(\frac{2\pi fB}{c}\right). \quad (13)$$

В этом случае задача сводится к корректному определению скорости звука в материале. Продольная скорость звука определяется по формуле [3]:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (14)$$

где E – модуль Юнга (для льняной пряжи $1,95 \times 10^6$ Па); μ – коэффициент Пуассона (для льна 0,45); ρ – объемная плотность (у льняной пряжи 90 кг/м^3). При этих значениях $c = 403 \text{ м/с}$. При толщине материала 4 мм импеданс на частоте 1000 Гц составит $583 \times 10^3 \text{ Н/(м}\cdot\text{с)}$ (для воздуха $4,2 \times 10^3 \text{ Н/(м}\cdot\text{с)}$) (рис. 3 – зависимость акустического импеданса от частоты звуковых колебаний).

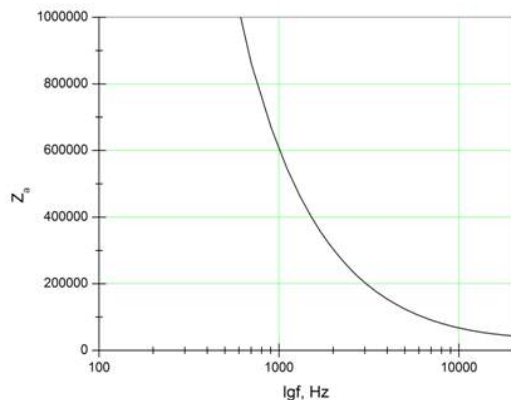


Рис. 3

Коэффициент звукопоглощения α связан со скоростью звука в материале следующим выражением [1], [4], полученным из формулы Стокса-Кирхгофа:

$$\alpha = \frac{2\omega^2 \eta}{3\rho c^3 \operatorname{cth}\left(\frac{2\pi fB}{c}\right)}, \quad (15)$$

где η – коэффициент сдвиговой вязкости, зависящий также от частоты колебаний.

Для лубяных волокон на частоте 1000 Гц $\eta = 560 \text{ Па}\cdot\text{с}$, при этом значение $\alpha = 0,98$. График функции (15) приведен на рис. 4. В

реальности значение η также зависит от частоты, поэтому экспериментальные зависимости α от частоты несколько иные – кривые 2 и 3 (рис. 4 – коэффициент звукопоглощения: 1 – график функции (15); 2 – экспериментальная зависимость для ячеистой структуры; 3 – экспериментальная зависимость для сплошной структуры) [5].

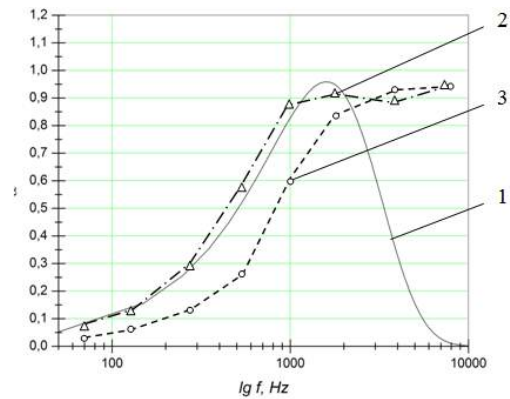


Рис. 4

С целью определения звукопоглощения льносодержащего трикотажа экспериментальные образцы были испытаны в реверберационной камере в соответствии с ГОСТ 26417–85. Определялось снижение уровня звукового давления за счет звукопоглощения двух слоев ткани из стеклонити (образец 1) поверхностной плотности 180 г/м^2 (основа 68 текс, уток 140 текс) и трикотажа в два слоя из льняной пряжи 84 текс поверхностной плотности 240 г/м^2 (образец 2). Звукопоглощающая облицовка составляла 46% площади внутренней поверхности камеры. Полученные звуковые спектры приведены в табл. 1 (измерения звукопоглощающей способности текстильных образцов) и на рис. 5.

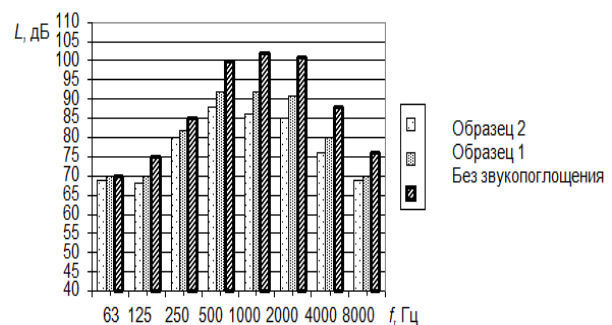


Рис. 5

Т а б л и ц а 1

Вариант	Уровень звукового давления по предельному спектру, дБ, в октавных полосах со среднегеометрической частотой, Гц								Эквивалентный уровень, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Без звукоизоляции	70	75	85	100	102	101	88	76	92
Со звукоизоляцией образец № 1	70	70	82	92	92	91	80	70	88
Со звукоизоляцией образец № 2	69	68	80	88	86	85	76	69	82

ВЫВОДЫ

1. Трикотажный льносодержащий образец показал лучшую звукопоглощающую способность.

2. Снижение уровня звукового давления на основных октавах соответствует расчетным значениям акустического импеданса и коэффициентов звукопоглощения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984.

2. Delany M.E., Bazley E.N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics v.3, 1970, pp. 105...116.

3. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. – М.: Изд-во МГУ, 1960.

4. Соловьянова И.П., Шабунин С.Н. Теория волновых процессов: Акустические волны. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004.

5. A preliminary study of sound absorption using multi-layer cocoon coir fibers [Электронный ресурс]/M.M. Nor, N. Jamaludin, F. M. Tamiri. //Technical Acoustics, 2004. – №3, <http://webcenter.ru>

Рекомендована кафедрой безопасности жизнедеятельности. Поступила 03.04.12.