

УДК 532.783

А. К. Изгородин, Д. Ю. Трусов, С. В. Зябликов, Е. В. Лебедева*

**ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА И СТРУКТУРНОГО
СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ИХ ШУМОЗАЩИТНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**INFLUENCE OF COMPONENTIAL COMPOSITION AND STRUCTURAL
STATE OF COMPOSITES ON THEIR NOISE PROTECTION
CHARACTERISTICS**

Ивановская государственная текстильная академия,
153000 Иваново, пр. Ф. Энгельса, д. 21. E-mail: izgorodin@igta.ru
* ООО «Солтек», Иваново, Аптечный пер., 11

В статье проведен анализ литературных данных о негативном воздействии акустического шума на организм человека и средствах защиты от него. Эффективность шумозащиты зависит от природы и структуры шумозащитного материала, а также взаимодействия с ним акустических волн. Определено значение коэффициента звукопоглощения известными и разработанными авторами статьи волокнистыми материалами содержащими углеродные нанотрубки. Показано повышение эффективности при реализации шумозащиты разработанными материалами по сравнению с ранее известными и проанализирована роль отдельных факторов: плотности, пористости, числа слоев и способа получения волокнистой основы, а также иммобилизации углеродных нанотрубок при воздействии акустических волн в различных частотных интервалах.

Ключевые слова: *волокнистая основа, деформация, дифракция, диффузия, затухание, индивидуальная защита, интерферометр, пористость, структура, углеродные нанотрубки, шум.*

The article analyzes the literature data on the negative effects of acoustic noise on the human body and the means of protection against it. The effectiveness of noise protection depends on the nature and structure of the sound protecting material, as well as its interaction with acoustic waves. The value of the acoustic absorption coefficient of known fibrous materials and the ones developed by the authors, which contain carbon nanotubes is defined. The increased efficiency of the developed materials in comparison with the known materials is shown and the role of the individual factors: density, porosity, number of layers and the method of preparation of the fibrous base, as well as the immobilization of carbon nanotubes under the influence of acoustic waves in different frequency intervals is analysed.

Key words: *fibrous base, strain, diffraction, diffusion, signal attenuation, individual defense, interferometer, porosity, structure, carbon nanotubes, noise.*

Введение

Среди факторов, отрицательно влияющих на организм человека, является шум, обычно представляющий собой совокупность акустических волн разной длины волны и амплитуды. Акустические волны проникают в организм человека через слуховой аппарат, кожный покров, кости опорного аппарата и черепа. В соответствии с санитарными нормами различных стран (Евростандарт, ГОСТ Р 51616 – 2000) допустимым уровнем шума является шум интенсивностью около 80 дБ. Воздействие акустических волн на организм человека обуславливает появление большого количества негативных последствий [1 – 3]:

- снижение слуховой чувствительности: порог слуха возрастает до 30 дБ;
- изменение работы сердечнососудистой системы: уменьшение частоты пульса, увеличение артериального давления;
- возникновение состояния усталости, снижение работоспособности, особенно умственной, головокружение и головная боль, бессонница;
- нарушение деятельности центральной нервной системы и обменных процессов;
- общее сотрясение тела человека при воздействии акустических волн интенсивностью свыше 125 дБ.

Наряду с шумоизоляцией и шумопоглотителями, которые устанавливают в зонах расположения источников шума, чрезвычайно важны средства индивидуальной защиты человека. Наиболее приемлемыми материалами для изготовления индивидуальной защиты являются ткани с соответствующими функциональными свойствами. Ткани, обладающие эластичностью, гибкостью и, в то же время, прочностью, могут быть компонентом материалом для изготовления элементов защиты любой зоны организма человека. Эти элементы защиты можно расположить как на изделиях, являющихся верхней одеждой, так и на нижнем белье.

В данной работе представлены результаты разработки компонентного состава и технологии получения нанокompозитов на волокнистой основе, предназначенных для изготовления элементов шумозащитной одежды. Шумозащитная одежда позволит решить важнейшую задачу – предотвратить проникновение акустических волн в организм человека через: кости человека и опорного скелета, кожу, брюшную полость и грудную клетку.

Взаимодействие акустических волн с веществом

Если волны распространяются в воздушной среде, то при встрече с объектом (препятствием) наблюдается отражение, преломление (рефракция), огибание (дифракция) волн, а внутри объекта, после проникновения в него волн – рассеяние (диффузия) и поглощение (затухание) их. Колеблющиеся частицы среды при прохождении акустической волны создают дополнительное давление P , амплитудное значение которого – P_0 равно [4]:

$$P_0 = \nu \rho \omega A, \quad (1)$$

где: ν – скорость распространения волн в данной среде, ρ – плотность среды, ω и A – угловая скорость и амплитуда колебаний частиц среды. Произведение $\rho \cdot \nu$ называют акустическим сопротивлением среды.

Сила звука, называемая в некоторых источниках интенсивностью Y , равна величине энергии, обусловленной движущейся акустической волной, проходящей в едини-

цу времени t через площадь S . Обычно t и S выражают в секундах и см^2 . Величина Y и P_0 взаимосвязаны соотношением [4]:

$$Y = \frac{P_0^2}{2\nu\rho}, \quad (2)$$

Используя взаимосвязь давления и интенсивности звука была также получена формула для вычисления силы звука путем определения давления P , оказываемого волной на непроницаемую поверхность [4]:

$$Y = \frac{2P\nu}{\mu+1}, \quad \mu = C_p/C_v, \quad (3)$$

где: C_p/C_v – отношение теплоемкости среды при постоянном давлении C_p и при постоянном объеме C_v .

В работах Умова Н. А. и Рэлея Р. Д. было показано, что соотношение между углами падения и преломления акустической волны такое же, как и в случае световой волны. Интенсивность звука, прошедшего во вторую среду при нормальном падении волн из первой среды на поверхность раздела первой и второй сред взаимосвязаны соотношением:

$$Y_2 = Y_1 \cdot 4 \frac{\nu_1\rho_1/\nu_2\rho_2}{\left(\frac{\nu_1\rho_1}{\nu_2\nu_2} + 1\right)^2}, \quad (4)$$

Из (4) следует, что если звуковая волна падает на материал с большим акустическим сопротивлением, т. е. $\nu_2\rho_2 \gg \nu_1\rho_1$, то знаменатель в формуле (4) равен единице. Тогда:

$$Y_2 = 4 Y_1 \cdot \frac{\nu_1\rho_1}{\nu_2\rho_2}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что для повышения эффективности шумоизоляции нужно выбирать материал с более высокими значениями плотности и скорости распространения в нем акустических волн. Повышенное значение ρ и ν характерно для металлов, следовательно, для изучения шумозащитных характеристик материала желательна металлизация его поверхности. В тоже время, применяя металлизацию нужно иметь в виду, что использование очень тонких металлических слоев может даже усилить звуковые волны, т. к. тонкий слой может играть роль мембраны передающей звук во вторую среду.

Эффективным направлением при создании шумозащитных материалов может быть разработка неоднородных материалов. В этом случае различные зоны, подобранные соответствующим образом, могут генерировать вторичные волны в противофазе, которые гасят друг друга. Неоднородности можно добиваться не только введением в материал различных компонентов, создавая пористость и т. д., но также воздействием на шумозащитные покрытия механическими, магнитными и электрическими полями.

Весьма заманчиво воспользоваться законом Рэлея о рассеянии света на частицах, размер которых много меньше длины волны света. Работы в этом направлении для решения проблемы шумозащиты очень важны, т.к. именно волны с большим значением длины волны легко преодолевают шумозащитные материалы.

Гашения акустических волн можно достичь путем создания материалов с повышенными характеристиками деформационно-релаксационных и фрикционных свойств, а также с созданием условий для протекания в них термофлуктуационных процессов. Релаксационно-деформационные и фрикционные потери могут быть эффективны в поглощении низкочастотных шумов, т.к. эти процессы протекают медленно во времени, а термофлуктуационные процессы для гашения шумов на высоких частотах, т.к. эти процессы происходят на атомном, молекулярном и, в некоторых случаях, надмолекулярном уровнях в течение наносекунд и менее.

Шумозащитные характеристики отдельных материалов и изделий, которые используют в настоящее время, приведены в табл. 1 [5 – 15]. Как видно из табл. 1, для характеристики поглощения материалом акустических волн используют различные величины: коэффициент поглощения звука – α/f^2 (с²/м), коэффициент звукопоглощения $a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}}$.

Таблица 1

Параметры материалов, определяющие их акустическое сопротивление, и характеристики шумозащиты

№ п/п	Вид материала	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Коэффициент поглощения звука	Примечание
1	Азот и кислород	1,25·10 ⁻³ и 1,43·10 ⁻³	334 и 314	$\alpha/f^2 = 1,35 \cdot 10^{-11} \text{ с}^2/\text{м}$	f = 44 кГц, 0°С
2	Бензол	1,09	202	$\alpha/f^2 = 1050 \cdot 10^{-11} \text{ с}^2/\text{м}$	f = 60 кГц, 100°С
3	Сероуглерод	1,26	205	$\alpha/f^2 = 1270 \cdot 10^{-11} \text{ с}^2/\text{м}$	f = 604 кГц, 0°С
4	Сероуглерод	1,26	1158	$\alpha/f^2 = 0,6 \cdot 10^{-11} \text{ с}^2/\text{м}$	f = 1 МГц, 20°С
5	Этиловый спирт	0,8	269	$\alpha/f^2 = 740 \cdot 10^{-11} \text{ с}^2/\text{м}$ $\alpha/f^2 = 53 \cdot 10^{-15} \text{ с}^2/\text{м}$	f = 100 кГц, 100°С f = 200 МГц, 25°С
6	Железо	7860	5850	-	-
7	Никель	8900	5630	$\alpha/f^2 = 102 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{м}$	f = 8 МГц
8	Фарфор	2800	5340	-	-
9	Базальт	3000	5700	$\alpha/f^2 = 1,23 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{м}$	f = 1 МГц
10	Полиэтилен	950	2480	$\alpha/f^2 = 5,2 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{м}$	f = 1 МГц
11	Фторопласт	1700	1340	-	-
12	Бетонная стена	1800–2500	3600÷4700	$a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}} = 0,01 \div 0,02$	f = 1÷1,5 кГц

Окончание табл. 1

13	Деревянная стена	350÷700	2500÷3600	$a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}} = 0,05 \div 0,09$	$f = 1 \text{ кГц}$
14	Кирпичная стена	1400÷1600	3200÷4600	$a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}} = 0,03 \div 0,04$	$f = 1 \div 1,4 \text{ кГц}$
15	Пористое пеностекло	1500÷2100	1300÷2000	$a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}} = 0,4 \div 0,06$	$f = 1 \div 1,5 \text{ кГц}$
16	Древесно-волоконистая плита	250÷400	2100÷2900	$a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}} = 0,4 \div 0,75$	$f = 1 \text{ кГц}$
17	Пеноябестовая стена	1600÷1900	300÷550	$a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}} = 0,5 \div 0,8$	$f = 1 \div 1,5 \text{ кГц}$
18	Плита из минеральных волокон	1600÷1900	3200÷4600	$a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}} = 0,6 \div 0,9$	$f = 1 \text{ кГц}$

*Представлены усредненные по литературным данным величины.

$\alpha = \frac{1}{L} \ln \frac{P_0}{P_L}$, где L – расстояние между точками в которых амплитуда давлений равно P_0

(исходная точка) и P_L – на расстоянии L от исходной точки.

$a = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}}$, где: $E_{\text{погл}}$ – уменьшение плотности звуковой энергии после прохождения материала. $E_{\text{пад}}$ – исходное значение плотности звуковой энергии.

Из данных табл. 1 видно, что при увеличении акустического сопротивления материала – $\rho \cdot v$, характеристики поглощения материалом энергии звуковых волн возрастают. Это видно, например, при сравнении значений α/f^2 для сероуглерода и этилового спирта при $t = 20 \div 25^\circ\text{C}$, а также никеля и базальта (табл. 1). Не менее важными параметрами, оказывающими влияние на поглощение материалом энергии акустических волн, являются частота звука и температура среды. Весьма существенное влияние на ослабление звука оказывает структурная организация материала. Например, пористость материалов (см. № 15 – 18 в табл. 1) обуславливает повышение их характеристик звукопоглощения в несколько раз: у деревянной стены значение коэффициента поглощения энергии акустических волн, почти в 10 раз ниже в сравнении с пористой древесно-волоконистой плитой (табл. 1).

Наряду с отмеченными выше закономерностями, из табл. 1 следует, что защитные свойства изделий при воздействии акустических волн зависят от большого количества факторов: природы материала, структурной организации изделия, частоты волн, температуры среды, размера, формы и природы иммобилизуемых в материал компонентов. При этом необходимо рассмотрение как деформационно-релаксационных и фрикционных процессов, так и интерференционно-дифракционных явлений.

Из представленного выше материала следует, что в настоящее время актуальны экспериментальные исследования, совокупность которых позволит, в дальнейшем, сформулировать принципы формирования шумозащитных материалов, с учетом всех факторов и теоретического описания процессов шумозащиты.

Шумозащитные свойства исследованных материалов в данной работе, характеризовали коэффициентом звукопоглощения α , значение которого определяли методом акустического интерферометра [11 – 15]. Схема установки представлена на рис. 1. Внутри трубы 1 на тележке 2 перемещается зонд 3. С одной стороны трубы 1 установлен испытуемый образец 4, закрепленный на массивной звукоизолирующий диск 5.

Диск 5 вместе с образцами удерживает обойма 6. Стоячие волны внутри трубы формируются путем наложения волн, излучаемых громкоговорителем 7, и волн, отраженных от звукоизолирующего диска 5. Волны, излучаемые громкоговорителем обеспечивают низкочастотный генератор 8, частоту этих волн измеряли электронносчетным частотометром 9. Интенсивность стоячих волн в трубе 1 измеряли посредством измерительного микрофона, перемещающегося вместе с зондом 3 на тележке 11. Перемещение тележки 11 регистрировали посредством измерительной шкалы 12. Сигнал от микрофона поступает на усилитель 13 и регистрируется электронным вольтметром 14, показания которого пропорциональны давлению P . Таким образом, справедливо отношение $P_{\max}/P_{\min}=U_{\max}/U_{\min}$.

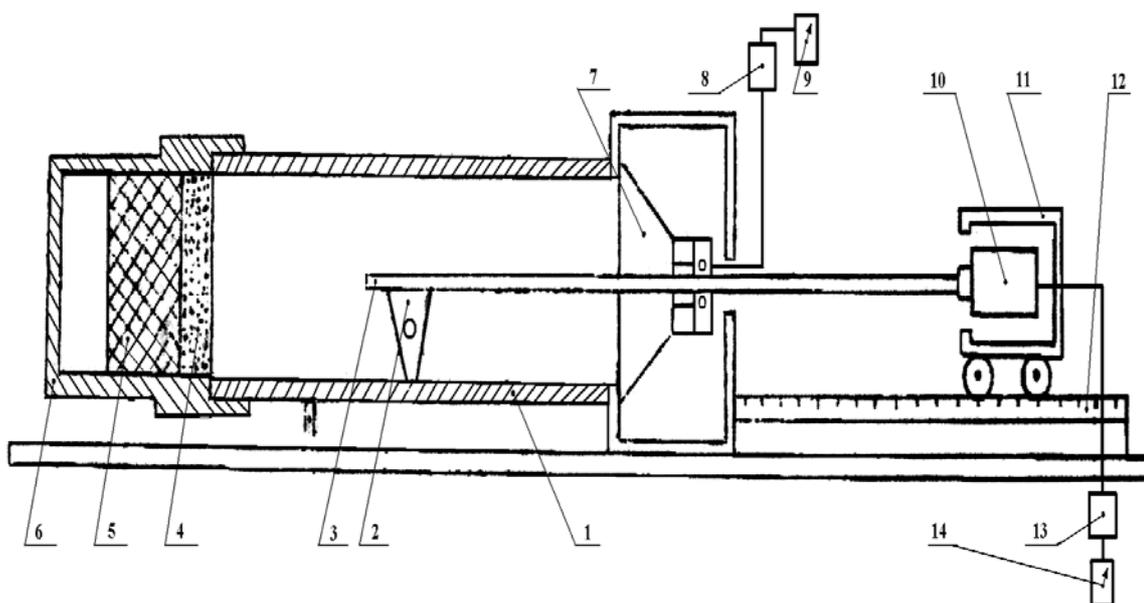


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициента звукопоглощения

Внутренний диаметр используемой измерительной трубы d равен 100 мм, а ее длина 1300 мм. Для предотвращения возникновения поверхностного резонанса в трубе частота волн f_B , создающих акустическое поле, должна быть не более [11, 13]:

$$f_B \leq \frac{\vartheta_6}{2d}, \quad (6)$$

где: ϑ_6 – скорость звука в воздухе, $\vartheta_6 = 330$ м/с.

Для проведения измерений в пределах трубы у стоячей волны должно быть не менее двух максимумов, а это означает, что частота должна быть не менее f_H :

$$f_H \geq \frac{\vartheta_6}{2l} \quad (7)$$

где: l – длина трубы.

Для трубы, используемой в нашей установке: $d = 100$ мм, а $l = 1300$ мм, $f_B = 1655$ Гц, $f_H = 127,3$ Гц. Следовательно, диапазон частот, в котором можно измерять шумозащитные свойства материалов на установке, представленной на рис. 1, составляет от 127 Гц до 1655 Гц. Именно в этом диапазоне частот, во многих случаях, определяют показатель шумозащиты материалов [11, 16]. В данной работе для характеристики материалов вычисляли коэффициент звукопоглощения α , определяемый по формуле [12]:

$$\alpha = \frac{4n}{2n + n^2 + 1}, \quad (8)$$

где: n – коэффициент стоячей волны равный: $n = P_{\max}/P_{\min}$; P_{\max} – максимальное значение звукового давления в трубе, а P_{\min} – минимальное значение звукового давления.

В работе исследованы образцы материалов, как используемых в настоящее время для шумозащиты, так и вновь разработанных материалов. В числе известных материалов были выбраны Акцент и ППУ-20, используемые в автомобилестроении и НО-Л-1А, используемый в вагоностроении. Экспериментальными были одно- и многослойные образцы: нетканых полотен из полиоксидибазольных волокон плотностью 120 г/м² (с повышенной пористостью) и плотностью 350 г/м² – с пониженной пористостью; ткани плотностью 180 г/м² из комплексных льноволокна пониженной и оптимальной зрелости. Все экспериментальные образцы были как без наполнителей, так и с углеродными нанотрубками в количестве $10 - 11$ % по массе. Полиоксидибазольные волокнистые полотна были использованы т. к. им характерны: высокая термоустойчивость, высокий уровень диполь-дипольных взаимодействий и неоднородности водородных связей, пониженная степень кристалличности. Перечисленные особенности структуры, внутри- и межмолекулярных связей в полиоксидибазольных волокнах могут обусловить повышенные деформационно-релаксационных характеристик, а также возникновение взаимодействий с вводимыми углеродными нанотрубками.

Для иммобилизации углеродных нанотрубок в волокнистую основу вначале получали, с использованием лопастного и УЗ-смесителей, композицию: ПВА, глицерин, пластификатор, углеродные нанотрубки. Иммобилизация композиции в волокнистую основу реализована ракельным методом и полимеризацией ее при $90 \div 100^\circ\text{C}$ в течение 30 минут.

Результаты определения коэффициента звукопоглощения на исследованных образцах представлены в табл. 2, а вид зависимости значения α от частоты акустического поля на примере одного из образцов – на рис. 2.

Анализ результатов, представленных в табл. 2 позволяет сформулировать следующие закономерности:

- на низких частотах $200 \div 500$ Гц полотна повышенной плотности обеспечивают более эффективное звукопоглощение. При увеличении же числа слоев с одного до пяти наблюдается незначительный рост α на $10 \div 17$ %;
- на повышенных частотах $800 \div 1250$ Гц шумопоглощение более эффективно при использовании менее плотного материала, обладающего повышенной пористостью;
- иглопрошивное льняное полотно с использованием волокон льна пониженной зрелости на низких частотах $200 \div 500$ Гц в большей мере – на $12 \div 20$ % ослабляет интенсивность звукового поля в сравнении с полотнами из волокон оптимальной зрелости. На повышенных частотах $630 \div 1250$ Гц у полотен из волокон льна пониженной и оптимальной зрелости значение α примерно одинаково;

- при введении углеродных нанотрубок в иглопрошивные полиаксидибазольные полотна их шумопоглощение на низких частотах снижается в 1,5÷4 раза, что является следствием снижения их релаксационно-деформационных характеристик, обусловленных возникновением связей между углеродными нанотрубками и функциональными звеньями макромолекул волокон. На повышенных же частотах после введения углеродных нанотрубок значение α возрастает в 2 – 4 раза. Аналогичные изменения значения α наблюдаются при введении углеродных нанотрубок и в другие, исследованные в данной работе, материалы;
- у используемых в настоящее время шумопоглощающих материалов ППУ-20, Акцент, НО-Л-1А значения α существенно ниже, особенно на низких частотах, в сравнении с вновь разработанными в данной работе.

Дальнейшее повышение шумозащитной эффективности исследуемых материалов путем изменения их компонентного состава и структурной организации возможно после детального анализа роли как деформационно-релаксационных механизмов поглощения энергии акустических волн, так и оптических эффектов – отражения, рефракции, дифракции и диффузии.

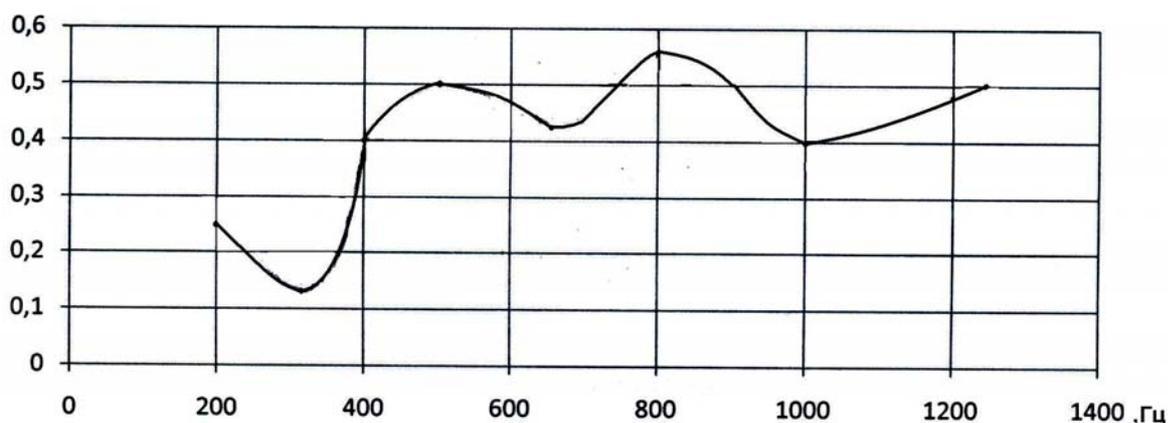
Таблица 2

Значение коэффициента звукопоглощения исследованных материалов

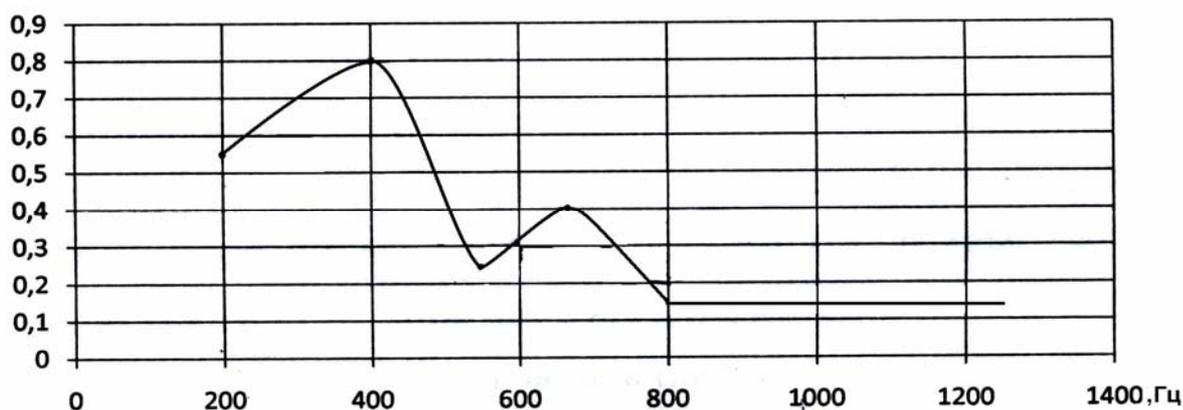
№ п/п	Материал	Кол-во слоев	Значение коэффициента звукопоглощения при разных частотах, Гц							
			200	315	400	500	630	800	1000	1250
1	Иглопрошивное, 120 г/м ² , полиоксидибазольное	1	0,49	0,28	0,42	0,14	0,16	0,16	0,23	0,28
		2	0,58	0,59	0,69	0,26	0,27	0,25	0,21	0,42
		3	0,57	0,64	0,75	0,25	0,29	0,27	0,36	0,48
		4	0,57	0,61	0,62	0,29	0,32	0,62	0,61	0,54
		5	0,85	0,52	0,64	0,31	0,38	0,48	0,66	0,67
2	Иглопрошивное, 350 г/м ² , полиоксидибазольное	1	0,59	0,61	0,49	0,38	0,34	0,16	0,18	0,17
		2	0,58	0,66	0,51	0,36	0,40	0,14	0,17	0,18
		3	0,64	0,69	0,54	0,31	0,37	0,18	0,14	0,19
		4	0,62	0,63	0,82	0,34	0,38	0,17	0,19	0,16
		5	0,69	0,71	0,82	0,42	0,41	0,19	0,21	0,14
3	Иглопрошивное полотно, из волокон льна пониженной зрелости, 180 г/м ²	1	0,42	0,39	0,48	0,42	0,29	0,18	0,19	0,16
4	Иглопрошивное полотно, волокна льна оптимальной зрелости, 180 г/м ²	1	0,37	0,36	0,39	0,41	0,28	0,19	0,17	0,18
5	ППУ-20	1	0,12	0,11	0,26	0,38	0,32	0,41	0,57	0,61
6	Акцент	1	0,11	0,13	0,28	0,46	0,67	0,71	0,80	0,70
7	НО-Л-1А	1	0,10	0,12	0,09	0,18	0,08	0,11	0,16	0,44

Продолжение табл. 2

1'	Образец № 1 с углеродными нанотрубками (УНТ)	5	0,18	0,11	0,12	0,10	0,46	0,74	0,76	0,78
2'	Образец № 2 с УНТ	5	0,26	0,24	0,20	0,44	0,40	0,46	0,42	0,51
3'	Образец № 3 с УНТ	1	0,18	0,22	0,27	0,31	0,38	0,36	0,39	0,41
4'	Образец № 4 с УНТ	1	0,31	0,32	0,34	0,32	0,36	0,32	0,34	0,39
5'	Образец № 5 с УНТ	1	0,22	0,26	0,39	0,48	0,51	0,62	0,59	0,68
6'	Образец № 6 с УНТ	1	0,11	0,14	0,29	0,45	0,71	0,76	0,84	0,81
7'	Образец № 7 с УНТ	1	0,09	0,20	0,11	0,24	0,23	0,29	0,34	0,56



а



б

Рис. 2. Изменение коэффициента звукопоглощения иглопрошивного полотна (5 слоев) с углеродными нанотрубками (а) и без нанотрубок (б)

Список использованной литературы

1. ГОСТ 12.1.003-83: Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.
2. Безопасность жизнедеятельности в машиностроении / под ред. Ю. М. Соломенцева. М. : Высшая школа, 2002. 328 с.
3. Андреева – Галкина Е.Ц., Алексеев С. В. и др. Шум и шумовая болезнь. Л. : Медицина, 1972. 303 с.
4. Путилов К. А. // Курс физики. М. : Изд-во техникотеоретической литературы, 1956. С. 360 – 393.
5. Физические величины : справочник. М. : Энергостиздат, 1991. С. 18 – 123, 133 –160.
6. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. М. : Наука, 1985. 160 с.
7. Физическая акустика. М. : Мир, 1973. Т. 6.
8. Свойства неорганических и органических соединений: Справочник Л. : Химия, 1971. 1168 с.
9. Вишу Шах. Справочное руководство по испытаниям пластмасс. СПб : НОТ. 2009. 732 с.
10. URL : www.ides.com/register.
11. *Per V. Bruel* : Sound Insulatijn and Room Acousties. Charman & Hall, London. 1955. P. 2 – 8.
12. ГОСТ 16297-80.
13. Боголенов И. И. Промышленная звукоизоляция. Л. : Судостроение, 1986. С. 120 – 132.
14. *Loo L. Voranek* : Acoustic Measurements. Wiley & Sons, New York. 1956. P. 6 – 10.
15. Методика определения коэффициента звукопоглощения акустических материалов методом стоячей волны. Иваново : ООО «Стандартпластплюс», 2000. 5 с.
16. URL : [www. baugum.ru](http://www.baugum.ru)

Поступила в редакцию 16.02.2012 г.